

# **Masterarbeit**

## **Entwicklung einer kriterienbasierten Bewertungsmethodik zum Vergleich von Varianten zukünftiger Aufbereitungsverfahren für das Wasserwerk Sulzfeld im Rahmen der Studie 2040 der Fernwasserversorgung Franken**

Darmstadt, den 12.08.16

Verfasser: Krüger, Magdalena Gabriele

Matrikelnummer: 2390941

Studiengang: Umweltingenieurwissenschaften

Professor: Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

1. Betreuerin: M. Sc. Sonja Geiß

2. Betreuer: M. Sc. Hermann Löhner



## Kurzdarstellung

Zur Sicherung der zukünftigen Wasserversorgung im Verbandsgebiet erstellt die Fernwasserversorgung Franken die „Studie 2040“, auf deren Basis Instandhaltungs- und Investitionsplanungen getätigt werden sollen. In diesem Rahmen muss auch der größte Versorgungsbereich Sulzfeld mit dem gleichnamigen Wasserwerk betrachtet werden. Die Anlage bereitet Rohwasser aus dem Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft auf und mischt es anschließend mit Wasser des Nachbarzweckverbands Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum.

Das Ziel der Arbeit besteht darin, auf Basis zukünftiger Versorgungsszenarien diverse Aufbereitungsvarianten für das Wasserwerk Sulzfeld zu ermitteln und diese in einem kriterienbasierten Bewertungssystem miteinander zu vergleichen. Nach einer ausführlichen Bestandsaufnahme wird ein Vergleich der derzeitigen Situation mit den Anforderungen bis zum Jahr 2040 vorgenommen. Als Ergebnis der Untersuchung zeigt sich, dass das Wasserwerk Sulzfeld um eine Aufbereitungsstufe zur organischen Spurenstoffentfernung und Enthärtung mit (Teil-) Entsalzung erweitert werden sollte.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird ein Bewertungsverfahren auf Basis der Nutzwertanalyse und der AHP-Methodik entwickelt. Das Verfahren berücksichtigt die drei Hauptziele „optimale Trinkwasserbeschaffenheit“, „hohe Wirtschaftlichkeit“ und „hohe betriebliche Integration und Sicherheit“. Folgende Aufbereitungsvarianten werden dabei miteinander verglichen: Aktivkohle und CARIX-Anlage; Ozonung, Aktivkohle und CARIX-Anlage; Nanofiltration und Niederdruckumkehrosmose. Als Vorzugsvariante wird das Verfahren der „Aktivkohle und CARIX-Anlage“ ermittelt.

## **Abstract**

To secure the future water supply in its territory, the “Fernwasserversorgung Franken” creates the “Study 2040” to allow prospective planning of maintenance and investment efforts. In this context the largest supply area “Sulzfeld” and its waterworks must be considered. The water treatment plant treats raw water from the catchment area Sulzfeld-Marktsteft and mixes it with water from the neighboring water supplier “Zweckverband Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum”.

The target of this study is to determine on the basis of future supply scenarios various treatment options for the waterworks “Sulzfeld” and to compare them in a criteria-based assessment system. A detailed survey to compare the present situation with the requirements until 2040 leads to the conclusion that the waterworks “Sulzfeld” should be expanded to include a purification step for organic trace substance removal and softening with (partial) desalination.

In the final part of this thesis an evaluation method is developed following a cost-benefit analysis and the AHP-method. The assessment system takes into account the three main goals “optimal drinking water quality”, “high efficiency” and “high level of operational integration and security”. The following treatment variants are taken into comparison: activated carbon and CARIX-plant; ozonation, activated carbon and CARIX-plant; nanofiltration and low pressure reverse osmosis. As preferred treatment method “activated carbon and CARIX-plant” is determined.



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Tabellenverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Die Fernwasserversorgung Franken .....	4
2.1 Entstehung .....	4
2.2 Das nordbayerische Ausgleichs- und Verbundsystem .....	5
2.3 Das Verbandsgebiet .....	8
2.3.1 Die Versorgungsbereiche .....	9
2.3.2 Wassergewinnung und Wasserbezug.....	10
2.4 Studie 2020 und 2040.....	12
3 Der Versorgungsbereich Sulzfeld- IST-Zustand.....	14
3.1 Allgemeines .....	14
3.2 Wassergewinnung .....	17
3.2.1 Entnahmerechte .....	19
3.2.2 Trinkwasserschutzgebiet .....	19
3.2.3 Geologische und hydrogeologische Bedingungen .....	20
3.3 Wasserlieferungsverträge .....	20
3.3.1 Wasserbezug.....	21
3.3.2 Wasserabgabe .....	21
3.4 Das Wasserwerk Sulzfeld .....	22
3.4.1 Untersuchungen zu alternativen Aufbereitungsverfahren.....	24
3.5 Wassermengenbilanz .....	26
3.5.1 Wassermengenbilanz im Versorgungsbereich Sulzfeld .....	26
3.5.2 Spitzenbedarf .....	29
3.6 Analyse der bestehenden Wasserqualität.....	34
3.6.1 Rohwasseranalysen .....	35
3.6.2 Reinwasseranalysen.....	40
3.6.3 Mainwasser .....	44
3.6.4 Anthropogene organische Spurenstoffe.....	45

3.6.5	Entwicklungstrend einzelner Parameter.....	50
3.6.6	Qualitative Bedeutung des Fremdwasserbezugs.....	50
4	Prognose 2040 .....	52
4.1	Prognose des Jahreswasserbedarfs bis 2040.....	52
4.2	Prognose des Tagesspitzenbedarfs bis 2040 .....	56
4.3	Zukünftige Anforderungen und Veränderungen der Trinkwasserqualität.....	58
5	Entwicklung eines Bewertungssystems .....	61
5.1	Grundlagen der Bewertungsmethode – Nutzwertanalyse .....	61
5.2	Problemanalyse und Rahmenbedingungen .....	62
5.3	Mindestanforderungen und Vorauswahl von Aufbereitungsvarianten.....	64
5.4	Beschreibung der Aufbereitungsvarianten .....	67
5.4.1	Ionenaustauschverfahren CARIX – Varianten 1 und 2.....	67
5.4.2	Membranverfahren – Varianten 3 und 4.....	78
5.5	Bewertung .....	89
5.5.1	Aufstellung des Zielsystems (Definition der Ziele und Kriterien).....	89
5.5.2	Ziel- und Kriteriengewichtung .....	91
5.5.3	Bestimmung der Zielfunktionen .....	96
5.5.4	Bewertung .....	99
5.5.5	Sensitivitätsanalyse .....	105
5.6	Empfehlung .....	108
6	Zusammenfassung und Fazit.....	111
	Literaturverzeichnis.....	IX
	Anhang 1 .....	XVIII
	Anhang 2 .....	XX
	Anhang 3.....	XXII
	Anhang 4 .....	XXIV
	Anhang 5 .....	XXVIII
	Anhang 6 .....	XXX
	Anhang 7 .....	XXXVI
	Anhang 8.....	XXXVIII
	Anhang 9 .....	XLII
	Anhang 10 .....	XLIV
	Anhang 11 .....	XLVI

Anhang 12 .....	XLVIII
Anhang 13 .....	LIV
Anhang 14 .....	LVI
Anhang 15 .....	LVIII
Anhang 16 .....	LX
Anhang 17 .....	LXIII
Anhang 18 .....	LXV



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versorgungsgebiete der FWF.....	10
Tabelle 2: Gewinnungsanlagen im Verbandsgebiet der FWF.....	11
Tabelle 3: Eigenwasserförderung der FWF im Jahr 2015 .....	11
Tabelle 4: Wasserlieferungsverträge der FWF mit anderen Zweckverbänden .....	12
Tabelle 5: Wasserbezug der FWF von Nachbarverbänden im Jahr 2015.....	12
Tabelle 6: wasserfördernde Brunnen im Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft ...	19
Tabelle 7: Wassermengenbilanz im Versorgungsbereich Sulzfeld .....	27
Tabelle 8: Wassermengenbilanz im Verbandsgebiet der FWF .....	29
Tabelle 9: Zusammenfassung des Spitzenbedarfs.....	34
Tabelle 10: Physikalisch-chemische Parameter der Brunnenwasser S1/HM/HS und S2/N1/N2.....	35
Tabelle 11: Physikalisch-chemische Parameter des Reinwassers nach Filter 1 bis 6, des WFW-Einlaufs und des Trinkwassers nach dem Saugbehälter .....	41
Tabelle 12: Main-Analysedaten von 2006 bis 2014.....	45
Tabelle 13: Spurenstoffe des Rohwassers mit Konzentration und Herkunft des Stoffes...46	
Tabelle 14: Berechnung des zukünftigen Wasserbedarfs in Abhängigkeit der Antwort aus dem Fragebogen der FWF-Kundenumfrage 2015.....	53
Tabelle 15: Berechnungsergebnisse der Jahreswasserabgabe bis zum Jahr 2040 .....	55
Tabelle 16: Berechnungsergebnisse der Tageswasserabgabe bis zum Jahr 2040 .....	58
Tabelle 17: Rohwasseranforderungen von Ionenaustausch- und Membranverfahren.....	66
Tabelle 18: Variante 1 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang.....	71
Tabelle 19: Variante 1 - Abwasserzusammensetzung.....	72
Tabelle 20: Variante 1 - Kostenschätzung.....	73
Tabelle 21: Variante 2 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang.....	75
Tabelle 22: Variante 2 - Kostenschätzung.....	77
Tabelle 23: Variante 3 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang.....	81
Tabelle 24: Variante 3 - Abwasserzusammensetzung.....	82
Tabelle 25: Variante 3 - Kostenschätzung.....	83
Tabelle 26: Variante 4 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang.....	86
Tabelle 27: Variante 4 - Abwasserzusammensetzung.....	87
Tabelle 28: Variante 4 - Kostenschätzung.....	87
Tabelle 29: Zielsystem zum Vergleich der verschiedenen Aufbereitungsvarianten .....	91
Tabelle 30: Bewertungsskala nach Saaty für die AHP-Methodik.....	92
Tabelle 31: Bestimmung des Random Index R. I. ....	93
Tabelle 32: Zielsystem mit Gewichtung der Ziele .....	94
Tabelle 33: Zuordnung der Zielerfüllungsfaktoren zum Zielerfüllungsgrad .....	96
Tabelle 34: Zuordnung Zielerfüllungsfaktor zu Zielwerten der Kriterien Spurenstoffentfernung, Gefährdungspotential Zusatzstoffe und Raumbedarf .....	99
Tabelle 35: Bewertungsmatrix für die Aufbereitungsvarianten im WW Sulzfeld.....	101

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vertraglich festgelegte zu liefernde Jahreshöchstmengen im nord-bayerischen Ausgleichs- und Verbundsystem.....	6
Abbildung 2: Nordbayerisches Ausgleichs- und Verbundsystem – Vergleich von Jahresdargebot mit dem Jahresbedarf 2003 .....	7
Abbildung 3: Jährlich verkaufte Wassermengen der FWF in m <sup>3</sup> /a und der max. Tages-spitzenwert in m <sup>3</sup> /d von 1953 bis 2011 .....	8
Abbildung 4: Verbandsgebiet der FWF .....	9
Abbildung 5: WW Sulzfeld .....	14
Abbildung 6: Übersichtsplan am Standort WW Sulzfeld (Brunnenleitung: grün; Fernleitung: blau) .....	15
Abbildung 7: Axialrad-Turbine am WFW-Zulauf .....	16
Abbildung 8: Fließschema für den Versorgungsbereich Sulzfeld .....	17
Abbildung 9: Horizontalfilterbrunnen Sulzfeld.....	18
Abbildung 10: Horizontalfilterbrunnen Marksteft.....	18
Abbildung 11: Oxidatoren und Einschichtfilter WW Sulzfeld.....	22
Abbildung 12: statischer Mischer vor SB WW Sulzfeld.....	23
Abbildung 13: Maschinenhalle WW Sulzfeld mit Netzpumpen, Druckstoßausgleichs-behältern und Spülluftgebläse.....	24
Abbildung 14: Grafische Darstellung der Wassermengenbilanz im Versorgungsbereich Sulzfeld.....	28
Abbildung 15: Monatszulaufwerte zum SB WW Sulzfeld (Eigengewinnung und WFW) von 2005 - 2015 [m <sup>3</sup> /Monat] als Boxplot .....	31
Abbildung 16: Tageszulaufwerte zum SB WW Sulzfeld (Eigengewinnung und WFW) von 2005 - 2015 [m <sup>3</sup> /d] als Boxplot .....	32
Abbildung 17: Monatliche Wasserabgabe im Versorgungsbereich Sulzfeld (insgesamt, inkl. Kunden und FWM) von 2005-2015 [m <sup>3</sup> /Monat] .....	33
Abbildung 18: Arzneimittelwirkstoffe in 84 untersuchten Proben von oberflächenwasser-beeinflussten Wasserversorgungsanlagen in Bayern.....	48
Abbildung 19: Luftbild WW Sulzfeld .....	63
Abbildung 20: Prinzip einer CARIX-Anlage (links: Beladung; rechts: Regeneration) .....	68
Abbildung 21: vereinfachtes Fließschema einer CARIX-Anlage.....	69
Abbildung 22: Fließschema der Aufbereitungsvariante Aktivkohle und CARIX .....	70
Abbildung 23: Fließschema der Aufbereitungsvariante Ozonung, Aktivkohle und CARIX .....	75
Abbildung 24: Verfahrensprinzip "Cross-Flow" der Membranverfahren LPRO und NF .....	78
Abbildung 25: Tannenbaumstruktur einer Membrananlage .....	79
Abbildung 26: Fließschema der Aufbereitungsvariante Nanofiltration .....	80
Abbildung 27: Fließschema der Aufbereitungsvariante Niederdruckumkehrosmose .....	86
Abbildung 28: Konzentratleitung (links) (L=150 m, DN=150 m) und Konzentratauslauf (rechts) nach LPRO-Membrananlage .....	88
Abbildung 29: Grafische Darstellung der Teil- und Gesamtnutzwerte .....	100
Abbildung 30: Grafische Darstellung der Gewichtung der Unterziele im Gesamtsystem .....	104

Abbildung 31: Veränderte Gesamtnutzwerte bei Verzicht auf Aktivkohle im Nebenstrom der Membrananlagen.....	105
Abbildung 32: Auswirkung einer veränderten Gewichtung der Hauptziele auf die Gesamtnutzwerte .....	107

## Abkürzungsverzeichnis

AK	Aktivkohle
BG	Bestimmungsgrenze
BP	Biozidprodukt
BRW	Bayerische Rieswasserversorgung
C. I.	Consistency Index
C. R.	Consistency Ratio
CIP	Chemische Reinigung (Cleaning in Place)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	N, N-Dimethylsulfamid
DOC	dissolved organic carbon
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
E	Einwohner
$f_d$	Tagesspitzenfaktor
FWF	Fernwasserversorgung Franken
FWM	Fernwasserversorgung Mittelmain
FWO	Fernwasserversorgung Oberfranken
GOW	Gesundheitlicher Orientierungswert
HB	Hochbehälter
$I_{\text{Nutz}}$	Nutzzinhalt
KBE/mL	Koloniebildende Einheiten pro Milliliter
$\lambda_{\text{max}}$	größter Eigenwert
LfStat	Bayerisches Landesamt für Statistik
LFU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
LPRO	Niederdruckumkehrosmose (low pressure reverse osmosis)
LW	Leitwert
Mio. m <sup>3</sup>	Millionen Kubikmeter
n	Dimension
NDMA	N, Nitroso-Dimethylamin
NF	Nanofiltration
NTU	Nephelometrische Trübungseinheiten
o. J.	Ohne Jahresangabe
PSM	Pflanzenschutzmittel
PW	Pumpwerk

$Q_a$	Jahreswasserbedarf
$Q_{dm}$	Mittlerer Tageswasserbedarf
$q_{dm}$	Einwohnerspezifischer Wasserbedarf
$Q_{dmax}$	Spitzen Tageswasserbedarf
R. I.	Random Index
RBG	Reckenberg-Gruppe
RMG	Rhön-Maintal-Gruppe
SAK	Spektraler Absorptionskoeffizient
SB WW Sulzfeld	Saugbehälter Wasserwerk Sulzfeld
TrinkwV 2001	Trinkwasserverordnung
Vgl.	Vergleich
WFW	Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum
WGA	Wassergewinnungsanlage
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRMG	Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln (Wasch- und Reinigungsmittelgesetz)
WVU	Wasserversorgungsunternehmen
WW	Wasserwerk

# 1 Einleitung

„Wenn der Brunnen trocken ist, schätzt man erst das Wasser!“, so sagt ein arabisches Sprichwort. Denn Wasser ist unsere Lebensgrundlage und als solche sollte es auch behandelt werden. Im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) wird schon in § 1 darauf verwiesen, dass Gewässer „als nutzbares Gut zu schützen“ sind. Während noch vor Jahren die bloße Wassergewinnung und -versorgung im Mittelpunkt standen, zeigt uns der Klimawandel, wie wichtig die nachhaltige Nutzung der Wasserressource für künftige Generationen ist, damit Trinkwasser in ausreichender Menge und guter Qualität zur Verfügung steht.

Auch in Bayern sind die ersten Auswirkungen des Klimawandels bereits spürbar. Mit 40,3 °C erreichte die Stadt Kitzingen in Franken im Sommer 2015 den Temperaturrekord seit dem Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881. Das wochenlange Ausbleiben von Niederschlägen setzte nicht nur den Landwirten zu, sondern forderte auch die Wasserversorger heraus. Durch solche Extremwetterereignisse wird die Grundwasserneubildung im ohnehin schon niederschlagsarmen Gips-Keuper-Gebiet weiter gesenkt. Mit z. T. weniger als 650 mm Niederschlagsanfall pro Jahr steht das Gebiet der Unter-/Mittelfranken im Kontrast zum Alpenraum in dem bis zu 2.000 mm Niederschlag pro Jahr fallen. (Löhner, 2015, S. 5; Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV), 2015)

Neben der Veränderung des Klimas werden Wasserversorgungsunternehmen (WVU) auch mit anderen Herausforderungen, wie dem demografischen Wandel, konfrontiert. Insbesondere in ländlichen Regionen führen die allgemeine Abwanderung junger Menschen und die niedrige Geburtenrate zu einem sinkenden Wasserverbrauch. Die sich verändernden Randbedingungen rufen in bestehenden Wasserversorgungsnetzen eine Überdimensionierung der Leitungen hervor und damit einhergehend längere Fließzeiten und ggf. eine Stagnation des Wassers. Je länger die Fließzeit des Wassers ist, umso höher ist die Gefahr der Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität durch Aufkeimung, Geschmacks- und Geruchsveränderungen. Das WVU hat somit einen geringeren Wasserverkauf, aber den gleichen oder sogar einen höheren Wartungsaufwand, z. B. durch Leitungsspülungen für die Erhaltung des Leitungsnetzes.

Weitere qualitative Herausforderungen für die Wasserwirtschaft stellen die steigenden Nitratbelastungen des Grundwassers in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten und anthropogene organische Spurenstoffe im Wasserkreislauf dar. So führt bspw. der Energiemaisanbau in Niedersachsen zu einem deutlich steigenden Trend bei Nitrat. (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2016) In der Gruppe der Spurenstoffe werden Substanzen zusammengefasst, die durch unterschiedlichste Anwendungen des Menschen in das Wasser eingetragen werden. Dazu zählen unter anderem Flamm- und Frostschutzmittel, Korrosionsinhibitoren,

Kraftstoffadditive, Haushaltsreiniger und nicht zuletzt die Arzneimittlrückständen, sowie deren Metaboliten.

Vor diesem Hintergrund müssen sich WVU die Frage stellen, in wieweit diese Wandelprozesse Einfluss auf den Wasserbedarf bzw. das Wasserdargebot haben und wie auch in Zukunft eine langfristige und ausreichende Versorgung der Bevölkerung gewährleistet werden kann. Denn Wasserversorgung ist eine Daseinsvorsorge und muss deshalb nachhaltig und zukunftsorientiert erfolgen.

Daher plant die Fernwasserversorgung Franken (FWF) für den Zeitraum bis zum Jahr 2040 eine Studie zu erstellen, auf deren Grundlage zukünftige Instandhaltungs- und Investitionsplanungen erarbeitet werden. Weiterhin enden die ersten wasserrechtlichen Bewilligungen zur Gewinnung von Grundwasser im Jahr 2020. Diese müssen mit einem Vorlauf von zwei bis drei Jahren neu beantragt werden, um auch zukünftig die Wasserversorgung sichern zu können. Zudem laufen ab 2023 einige Wasserlieferungsverträge mit benachbarten WVU aus. Um vertragliche Verhandlungen mit anderen Zweckverbänden führen zu können, ist die vorherige Entwicklung eines Versorgungskonzeptes für Normal- und Ersatzversorgungsvarianten notwendig. Dafür müssen Wasserbedarfsprognosen und zukünftige Einflüsse auf die Wasserqualität untersucht werden.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer kriterienbasierten Bewertungsmethodik zum Vergleich von Varianten zukünftiger Aufbereitungsverfahren für das Wasserwerk Sulzfeld im Rahmen der FWF-Studie 2040.

Der Versorgungsbereich Sulzfeld ist der größte Versorgungsbereich der FWF. 2015 wurden von einer Gesamtabgabe im Verbandsgebiet von 17,6 Mio. m<sup>3</sup>/a in Sulzfeld 7,7 Mio. m<sup>3</sup>/a Wasser abgegeben. Zugleich verfügt der Versorgungsbereich Sulzfeld über das größte Wasserentnahmerecht im Verbandsgebiet mit max. 6,5 Mio. m<sup>3</sup>/a (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 54). Daher ist ein ressourcenschonendes, nachhaltiges und zukunftsorientiertes Konzept nicht nur für den Versorgungsbereich Sulzfeld, sondern für das gesamte Verbandsgebiet von großer Bedeutung. Die Masterarbeit ist ein wichtiger Bestandteil innerhalb der „Studie 2040“, da sie eine Entscheidungsbasis für das zukünftige Aufbereitungskonzept des Wasserwerks Sulzfeld darstellt.

Dafür muss im ersten Teil der Arbeit eine Bestandsanalyse durchgeführt werden. Diese beinhaltet neben einer Literaturrecherche und Interviews, die Begehung und Bestandsaufnahme des Wasserwerks Sulzfeld, die Erstellung einer Wassermengenbilanz für den Versorgungsbereich Sulzfeld und eine Analyse der Roh- und Trinkwasserqualität.

Im zweiten Teil der Arbeit wird auf Basis der „Studie 2020“ und des „Kundendialogs 2015“ eine Wasserbedarfsprognose bis ins Jahr 2040 erstellt. Weiterhin werden zukünftige Anforderungen und Herausforderungen an die Wasserqualität erarbeitet und dem

Bestand gegenübergestellt. Aus diesem Vergleich heraus können für die Zukunft verschiedene Aufbereitungsmöglichkeiten bzw. Versorgungsvarianten erarbeitet werden.

Im dritten Teil der Arbeit erfolgt die Variantenauswahl. Dafür muss eine geeignete Bewertungsmethode entwickelt werden, die einen sinnvollen Vergleich der Varianten untereinander ermöglicht. Durch die Auswahl und Gewichtung geeigneter Kriterien, sowie die Entwicklung einer Bewertungsskala kann ein direkter Vergleich der Varianten erfolgen und eine Präferenzordnung erstellt werden. Letztlich wird eine Empfehlung für ein zukünftiges Aufbereitungskonzept des Wasserwerks Sulzfeld ausgesprochen.



## 2 Die Fernwasserversorgung Franken

### 2.1 Entstehung

Das fränkische Gips-Keuper-Land ist durch Niederschlagsarmut, sowie geringe und qualitativ unzureichende Wasservorkommen geprägt. Daher kamen schon in den zwanziger Jahren vom Bayerischen Landesamt für Wasserversorgung und Gewässerschutz die ersten Überlegungen auf, die Wasserversorgung über eine Gruppenanlage zu regulieren. Die Umsetzung eines in den dreißiger Jahren entstandenen Entwurfes wurde durch den 2. Weltkrieg verhindert. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 13)

Der steigende Wasserbedarf nach dem 2. Weltkrieg, aufgrund wachsender Einwohnerzahlen und die Trockenjahre 1947 und 1949 verdeutlichten die Notwendigkeit einer überregionalen Wasserversorgung. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 13)

1950 sprach sich das Bayerische Landesamt für Wasserversorgung und Gewässerschutz für eine überregionale und bessere Wasserversorgung in Westmittelfranken aus und gründete ein Planungsbüro, welches einen Entwurf für die Wasserversorgung liefern sollte. Dieser war Grundlage für den am 14. Juni 1951 gegründeten Zweckverband Wasserversorgung Mittelfranken West, später Fernwasserversorgung Franken (FWF). Ziel der Verbandsgründung sollte der Ausgleich der ungleich verteilten Wasservorkommen sein. Durch die Wassererschließung in wasserreichen Randgebieten sollten wasserärmere Gebiete mitversorgt werden. Der Verbund der Anlagen sollte die Versorgung absichern. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 13; Fernwasserversorgung Franken, 2001, S. 5)

Die Wasserbeschaffung, die Lieferung von Trinkwasser und die Beseitigung der akuten Wassernot waren zu Gründungszeiten die wichtigsten Aufgaben des Zweckverbandes. Heute formuliert die Verbandssatzung (Fernwasserversorgung Franken, 1994, S. 4) die Aufgaben des Wasserbeschaffungsverbandes wie folgt:

- die Erschließung, Beschaffung und falls erforderlich Aufbereitung von Grundwasser,
- die Bereithaltung von Wasser aus Wasservorkommen,
- die Belieferung von Trägern der örtlichen Wasserversorgung mit Wasser (nach DIN 2000, auf vertraglicher Grundlage und innerhalb der versorgungswirtschaftlichen Möglichkeiten),
- die Errichtung, erforderlichenfalls die zukünftige Erweiterung, der Betrieb und die Unterhaltung einer überörtlichen Wasserversorgungsanlage.

Über die Aufgaben der Wasserbeschaffung hinaus muss der Zweckverband heutzutage auch den wachsenden Qualitätsansprüchen an das Trinkwasser gerecht werden. Der Schutz des Grundwassers und der sinnvolle Umgang mit dem Wasser haben sich zu

weiteren essentiellen Aufgaben der Fernwasserversorgung entwickelt. (Fernwasserversorgung Franken, 2001, S. 5)

## **2.2 Das nordbayerische Ausgleichs- und Verbundsystem**

Bis 1985 vergrößerte sich, durch steigende Abnehmerzahlen und einen wachsenden Wasserbedarf der Bevölkerung und Wirtschaft, der Druck auf die Wasserverbände im nordbayerischen Wassermangelgebiet. Andere Verbände, wie die Bayerische Rieswasserversorgung (BRW), Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum (WFW) und die Reckenberg-Gruppe (RBG), verfügten über ein großes Wasserdargebot, das den Bedarf weit überschritt. Aus dieser Situation heraus gründete sich das nordbayerische Ausgleichs- und Verbundsystem, welches den Verbänden in Wassermangelgebieten die Möglichkeit bot, Zusatzwasser von benachbarten Unternehmen zu beziehen. Zwischen 1960 und 2000 erfolgte der Aufbau der erforderlichen Infrastruktur. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 27) Heute sind die nachfolgenden Zweckverbände am Verbund beteiligt:

- Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum (WFW)
- Fernwasserversorgung Franken (FWF)
- Fernwasserversorgung Oberfranken (FWO)
- Reckenberg-Gruppe (RBG)
- Fernwasserversorgung Mittelmain (FWM)
- Bayerische Rieswasserversorgung (BRW).

Am 30.09.2005 unterzeichneten die Zweckverbände die Vereinbarung „Arbeitsgemeinschaft zum Ausgleich und Verbund in der Wasserversorgung in Nordbayern (ARGE WV-Nordbayern)“. Seither ist die Kooperation der Verbände verbindlich. Der Zweckverband zur Versorgung der Rhön-Maintal-Gruppe (RMG) ist ein weiteres Mitglied der ARGE WV-Nordbayern, allerdings besteht keine Verbindung zum Ausgleichs- und Verbundsystem. Abbildung 1 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 30) stellt die vertragliche Situation zwischen den Verbundpartnern dar. Es werden die zu liefernden Jahreshöchstmengen in Mio. m<sup>3</sup> angegeben. In Klammern befindet sich das Ende der Vertragslaufzeit (Stand 2012).

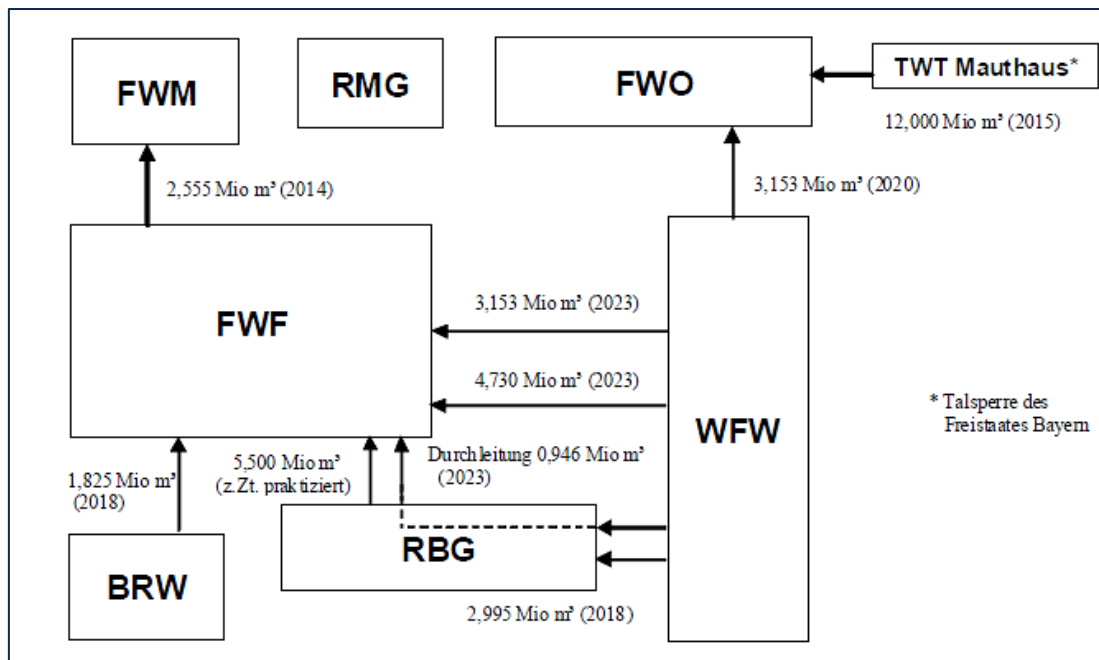


Abbildung 1: Vertraglich festgelegte zu liefernde Jahreshöchstmengen im nordbayerischen Ausgleichs- und Verbundsystem

Das gesamte nordbayerische Ausgleichs- und Verbundsystem wird in Abbildung 2 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 23) veranschaulicht. Es wird deutlich, dass das Jahreswasserdargebot (blauer Balken) in den Zweckverbänden WFW, RBG und BRW den Jahreswasserbedarf (violetter Balken) übersteigt. Somit beliefern diese die Verbände in denen ein umgekehrtes Verhältnis besteht. Während die FWO das Zusatzwasser direkt erhält, muss die FWF für die FWM als Zwischenlieferant fungieren. Die FWF erhält das Wasser überwiegend auf direktem Weg von der RBG, der BRW und der WFW. Lediglich im südlichen Verbandsgebiet erhält die FWF zusätzlich Wasser von der WFW, welches über das Verbandsgebiet der RBG geliefert wird.

Die FWF war bis 1968 in der Lage den Wasserbedarf ausschließlich über eigenes erschlossenes Grundwasser zu decken, aber schon ab 1965 zeigte sich, dass im südlichen Verbandsgebiet das Dargebot nicht ausreichen würde, um den Bedarf langfristig zu decken. Somit erfolgte ab 1969 der Wasserbezug aus dem Verbandsgebiet der BRW. Der steigende Wasserbedarf bis 1990 und die Erhöhung der Liefermengen für die FWM erforderten einen Zusatzwasserbezug von der WFW, der RBG und der BRW. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 32)

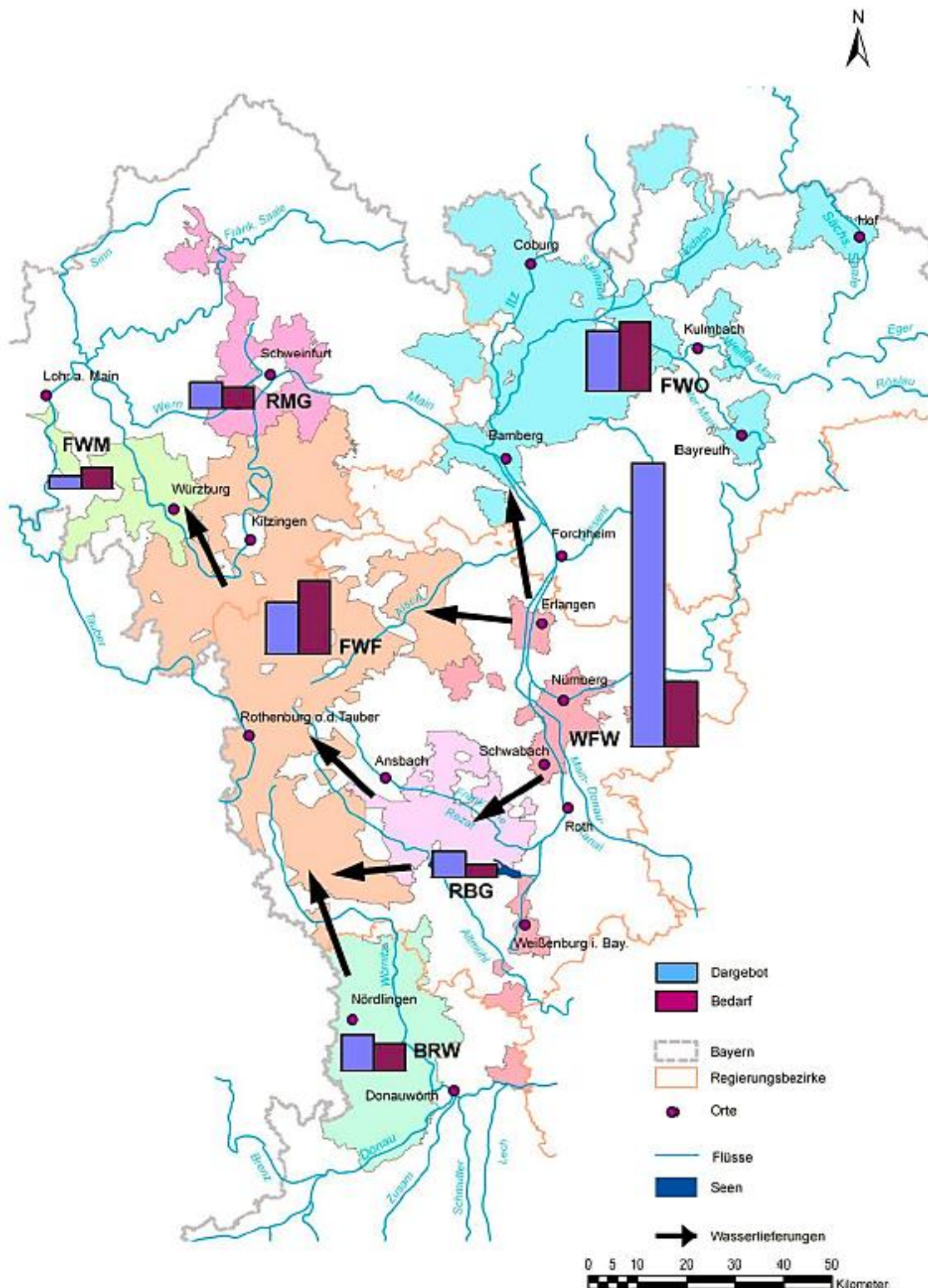


Abbildung 2: Nordbayerisches Ausgleichs- und Verbundsystem – Vergleich von Jahresdargebot mit dem Jahresbedarf 2003

Die Wasserabgaben der FWF von 1953 bis 2011 sind in Abbildung 3 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 34) aufgeführt. Bis 1990 ist ein deutlicher Anstieg der verkauften Wassermengen auf rund 18.500.000 m<sup>3</sup>/a zu verzeichnen. Begründet wird

dies durch den Ausbau der Verbandsanlagen mit dem ein höherer Anschlussgrad und damit ein steigender Wasserverbrauch einhergingen. Des Weiteren spielten der wachsende Wasserbedarf in Bevölkerung und Industrie, sowie die Belieferung der FWM ab 1987 eine zentrale Rolle. Anfang der 90er Jahre sank die Wasserabgabe geringfügig und stagnierte schließlich bei rund 17,3 Mio. m<sup>3</sup>/a. 1976, 1983, 1990, 1991 und 2003 sind Trockenjahre in denen durchschnittlich hohe Wasserabgaben und Höchstwerte der Tagesspitzenwerte zu verzeichnen sind. (Roth, Berger, Müller, & Wagner, 2008, S. 866; VFZ - Verband Fränkischer Zuckerrübenbauer e.V., 2015, S. 1; Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 34)

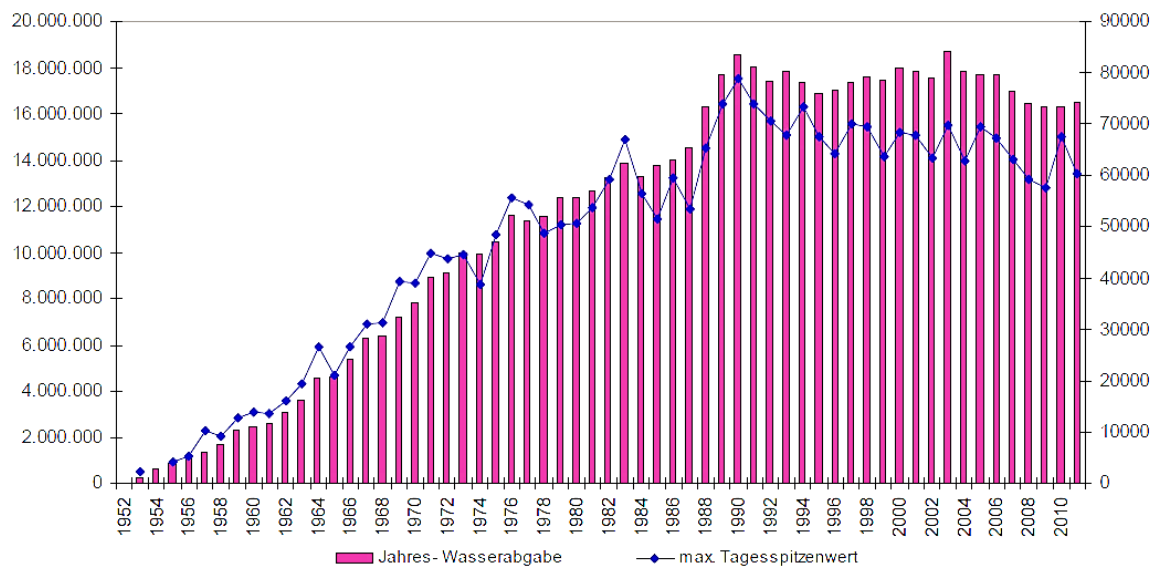


Abbildung 3: Jährlich verkaufte Wassermengen der FWF in m<sup>3</sup>/a und der max. Tagesspitzenwert in m<sup>3</sup>/d von 1953 bis 2011

## 2.3 Das Verbandsgebiet

Seit 1953 erfolgt die Wasserversorgung durch die FWF. Die Größe des Versorgungsgebietes wurde zu Beginn durch die hydrogeologischen Verhältnisse beschränkt, die die förderbaren Wassermengen bestimmten. Im Ursprung gewann die FWF ihr Grundwasser aus den Gebieten Gollhofen, Haslach, Uehlfeld und Marktsteft. Später erforderte der steigende Wasserbedarf die Erschließung der Gebiete Matzmannsdorf, Sulzfeld, Volkach und Astheim. Seit 1977 sind die vier Vertikalfilterbrunnen der Gewinnungsanlage Gollhofen stillgelegt, aufgrund einer Wasserhärte von 5,7 mmol/L und sehr hohen Eisen- und Mangankonzentrationen. Zu den Verbandsmitgliedern der ersten Stunde gehören die Landkreise Dinkelsbühl, Feuchtwangen, Gerolzhofen, Kitzingen, Neustadt a. d. Aisch, Rothenburg o. d. Tauber, Scheinfeld und Uffenheim, sowie die kreisfreie Stadt Rothenburg o. d. Tauber und die Gemeinde Gnodstadt. Abbildung 4 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 14) zeigt das heutige ca. 4.700 km<sup>2</sup> große Verbandsgebiet, welches Teile der Landkreise Ansbach,

Erlangen-Höchststadt, Schweinfurt und Würzburg, die Landkreise Kitzingen und Neustadt a. d. Aisch-Bad Windsheim, sowie die große Kreisstadt Rothenburg o. d. Tauber umfasst.



Abbildung 4: Verbandsgebiet der FWF

Die FWF versorgt 146 Städte und Gemeinden mit 669 Ortsteilen. Diese zählen 380.000 Einwohner. Hinzukommen weitere 50.000 Einwohner bei Vertragsabnehmern. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 13; Löhner, 2015, S. 2f)

### 2.3.1 Die Versorgungsbereiche

Das Verbandsgebiet ist technisch in Versorgungsbereiche untergliedert. Diese werden als hydraulisch voneinander getrennte Rohrnetzbereiche mit gleicher Wasserqualität bezeichnet. Ein Versorgungsbereich kann eine oder mehrere Versorgungszonen enthalten. Versorgungszonen sind, entsprechend der Höhenlage des Wasserspiegels im Haupthochbehälter, Rohrnetzzonen mit gleichem Druck, die nicht immer hydraulisch voneinander getrennt sein müssen. (Fernwasserversorgung Franken, 2015, S. 6)

Die FWF besitzt neun Versorgungsbereiche: Sulzfeld, Volkach, Uehlfeld, Hüttendorf, Elpersdorf, Haslach, Matzmansdorf, Arberg und Schopflohe. Die Tabelle 1 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 57) enthält eine Auflistung der Versorgungsbereiche und stellt diesen die Wasserherkunft und mittlere Wasserabgabe in m<sup>3</sup>/a gegenüber. Sulzfeld ist bzgl. der Wasserabgabe mit Abstand der größte Versorgungsbereich gefolgt von Elpersdorf und Haslach. (Löhner, 2015, S. 3; Fernwasserversorgung Franken, 2015, S. 6ff)

Tabelle 1: Versorgungsgebiete der FWF

Nr.	Versorgungsbereich	Wasserherkunft	Mittl. Wasserabgabe in m³/a	Redundante Versorgung möglich	
				ja/teilw./nein	Bemerkungen
1	Sulzfeld	WGA Sulzfeld-Marktsteft (100 – 385 l/s) WFW ca. 200 l/s konst.	7.500.000	teilweise	Siehe Betriebsbeschreibung der FWF
2	Volkach	WGA Volkach-Astheim	1.850.000	teilweise	Wie 1.
3	Uehlfeld	WGA Uehlfeld I und II	1.200.000	ja, zeitlich begrenzt	Wie 1.
4	Hüttendorf	WFW	700.000	ja	Wie 1.
5	Elpersdorf	RBG	2.750.000	teilweise	Wie 1.
6	Haslach	WGA Haslach 1/3, RBG 1/3 BRW 1/3	2.350.000	ja, zeitlich begrenzt	Wie 1.
7	Matzmannsdorf	WGA Matzmannsdorf	500.000	ja	Wie 1.
8	Arberg	RBG	70.000	ja	Wie 1.
9	Schopflohe	BRW	90.000	ja	Wie 1.

### 2.3.2 Wassergewinnung und Wasserbezug

Aufgrund des geringen Wasserdargebotes im Versorgungsgebiet der FWF, kann diese durch Eigenförderung nur rund 40 % der benötigten Gesamtwasserabgabe decken. Weitere 60 % werden durch Fremdwasserbezug aus den benachbarten Zweckverbänden abgedeckt. Die jährliche Wasserabgabe beträgt durchschnittlich rund 16,8 Mio. m³ (von 2005 bis 2015).

#### 2.3.2.1 Eigengewinnung

Die FWF besitzt 52 Brunnen von denen 48 Brunnen in Betrieb und vier Vertikalfilterbrunnen stillgelegt sind. In Tabelle 2 (wasserrechtliche Bewilligung, 1996; wasserrechtliche Bewilligung, 2013; wasserrechtliche Bewilligung, 1997; wasserrechtliche Bewilligung, 2006; Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 54) werden die Gewinnungsanlagen mit den jeweils zugehörigen Brunnen dargestellt. Weiterhin werden die maximalen Entnahmemengen entsprechend der wasserrechtlichen Bewilligung aufgeführt. Die Laufzeit der Bewilligung geht ebenfalls aus der Tabelle hervor. Der Versorgungsbereich Sulzfeld hat die größte bewilligte Wasserentnahmemenge und ist damit für das Verbandsgebiet der FWF auch am bedeutendsten. Mit einer maximal bewilligten Wasserentnahmemenge von weniger als 40 % der Entnahmemenge in Sulzfeld-Marktsteft folgt die Wassergewinnungsanlage (WGA) Volkach-Astheim. Die WGA Uehlfeld I und II und Haslach-Matzmannsdorf sind bedeutend kleiner als die zuvor genannten. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, ist die WGA Gollhofen stillgelegt.



Tabelle 2: Gewinnungsanlagen im Verbandsgebiet der FWF

Gewinnungs- anlage	Anzahl der Fassungen	Bescheid vom	Befristet bis	Max Entnahmemenge			Bemerkung
				m³/a	m³/d	L/s	
Sulzfeld- Marktsteft	6 Brunnen	17.10.1997	31.12.2020	6.500.000	33.330	385	
Volkach- Astheim	17 Brunnen	17.07.1996	31.12.2025	2.409.000	12.100	140	
Uehlfeld I und II	12 Brunnen	02.11.2006	31.12.2021	1.580.000	7.600	88	
Haslach- Matzmannsdorf	13 Brunnen	23.12.2013	31.12.2033	1.600.000	7.300	84,5	
Gollhofen	4 Brunnen	14.08.1956	unbefristet			34	Nicht genutzt

Im Jahr 2015 wurden rund 7,8 Mio. m³ Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen gefördert. Die Wassermengen und deren prozentuale Aufteilung auf die Wassergewinnungsgebiete der FWF können aus Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Eigenwasserförderung der FWF im Jahr 2015

Wassergewinnungsgebiet	Wassermenge [m³]	Prozentuale Aufteilung [%]
Sulzfeld-Marktsteft	3.088.801	39,8
Volkach-Astheim	2.124.751	27,4
Uehlfeld I und II	1.274.298	16,4
Haslach-Matzmannsdorf	1.274.302	16,4
Gollhofen	Derzeit nicht bewirtschaftet	

### 2.3.2.2 Fremdbezug

Zur Deckung des Gesamtwasserbedarfs werden weitere 60 % von benachbarten Wasserversorgungsunternehmen, wie der WFW, der RBG und der BRW bereitgestellt. Tabelle 4 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 55) zeigt die derzeit existierenden Wasserlieferungsverträge zwischen der FWF und den Zweckverbänden. Die Laufzeiten sind zum Teil nicht mehr auf dem aktuellsten Stand. Aus der Tabelle 4 wird ersichtlich, dass die WFW der größte Wasserlieferant der FWF ist. Ein Großteil der Lieferung (in Tabelle 4 die Nr. 2 und 3) wird dabei über den Versorgungsbereich Sulzfeld geliefert, der u. a. als Zwischenlieferant für die FWM dient, die täglich 7.000 m³ Wasser bestellt (Wasserlieferungsvertrag, 2010, S. 1)



Tabelle 4: Wasserlieferungsverträge der FWF mit anderen Zweckverbänden

Nr.	Zulieferer	Vertrag vom	Laufzeit bis	Ordentl. Kund.-frist	Höchstmenge				Mindestmenge		Bemerkungen
					jährlich		täglich		m³/d	l/s	
					m³/a	l/s	m³/d	l/s			
1	WFW/RBG	20.12.1994	31.12.2023		946.080	30	2.592	30	2.592	30	Durchleitung durch RBG
2	WFW	19.11.1979	31.12.2019		3.153.600	100	8.640	100	1.728	20	Bandbezug, Kosten fallen auch bei Nichtabnahme an
3	WFW	29.12.1989	31.12.2023		4.730.400	150	12.960	150	2.592	30	Bandbezug, Kosten fallen auch bei Nichtabnahme an
4	RBG	09.09.1992	31.12.2027		5.500.000		19.950	231	4.400	51	Über Elpersdorf 14.000 m³/d und über Arberg 5.950 m³/d; z.Zt. praktiziert gem. Vereinbarung vom Jan. 1996; Vertrag wird 2012 angepasst
5	BRW	31.01.1994	31.12.2018	5 Jahre zum Vertragsablauf	1.825.000	58	5.000	58	1.000	12	Über Schopflohe, Kosten fallen auch bei Nichtabnahme an

Im Jahr 2015 bezog die FWF 10,3 Mio. m³ Wasser von Nachbarverbänden. In Tabelle 5 ist die Verteilung dieser Wassermengen auf die Zweckverbände dargestellt. Die WFW lieferte dabei über 50 % der Wassermenge.

Tabelle 5: Wasserbezug der FWF von Nachbarverbänden im Jahr 2015

Zweckverband	Wassermenge [m³]	Prozentuale Verteilung [%]
WFW	5.519.060	53,8
RBG	3.675.183	35,8
BRW	1.070.969	10,4

## 2.4 Studie 2020 und 2040

1997 beauftragte die FWF die INSUMMA Projektgesellschaft mbH mit der „Studie 2010/2020“. Diese beinhaltete die Erstellung einer Wasserbedarfsprognose für das Jahr 2020, eine hydraulische Rohrnetz- und Behälterberechnung, sowie eine Maßnahmenbewertung und Kostenschätzung durch die Erfassung und Beurteilung aller Bauwerke

bzw. Anlagen. Die Studie sollte als Grundlage für den späteren Ausbau und ggf. für die Erneuerung der Anlagen dienen. Rückblickend ist festzustellen, dass die Wasserbedarfsprognose nicht mit dem tatsächlichen Wasserbedarf übereinstimmte. Die Wasserabgaben liegen in fast allen Versorgungsbereichen weit unterhalb der vorhergesagten Minimalwerte. Dennoch konnte die FWF die empfohlenen baulichen Maßnahmen planmäßig umsetzen. (INSUMMA Projektgesellschaft mbH, 2000)

Aufbauend auf der bereits vorliegenden „Studie 2010/2020“ ist nun die Erstellung einer „Studie 2040“ geplant, mit deren Hilfe zukünftige Investitionen abgeschätzt werden, die den Substanzerhalt und die Versorgungssicherheit im Verbandsgebiet gewährleisten sollen. Ziel ist der Konzeptentwurf für eine zukünftig nachhaltige und wirtschaftliche Nutzung der Ressource Wasser. Die „Studie 2040“ besteht aus den folgenden fünf Abschnitten: „[...]“

1. *Fortschreibung der Wasserbedarfsprognose und Rohrnetzberechnung*
2. *Bedarfsdeckung durch eigene Wassergewinnung und Wasserbezug von Vorlieferanten*
3. *Identifikation von Maßnahmen für Neubau, Sanierung und Erneuerung*
4. *Wirtschaftlichkeit und Finanzierungsmöglichkeiten: Wasserpreiskalkulation und Wassertarifstruktur*
5. *Ausbau und Neuabschluss von Kooperationen, Betriebsführungen und Dienstleistungen.*“ (Werkausschuss, 2015, S. 1f)

Durch eine Kundenbefragung mit anschließendem Kundendialog hofft die FWF vor der Erstellung eines konkreten Konzeptes für die „Studie 2040“ Kundenbedürfnisse und zukünftige Entwicklungen herauszufinden. Eine von Juli bis Oktober 2015 durchgeführte Kundenbefragung der FWF lieferte erste Daten für die „Studie 2040“. Die Umfrage fand in Form von Fragebögen statt. Ziel ist die Aktualisierung der Wasserbedarfsanalyse, die Ermittlung der Kundenzufriedenheit, das Erkennen von Kooperations- und Dienstleistungspotentialen und eine Optimierung des Kundenservices. (Werkausschuss, 2015a, S. 1f)

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Kundenbefragung 2015 zum Thema Einwohnerentwicklung und Wasserbedarfsentwicklung vorgestellt und weiterführend für die Erstellung einer Wasserbedarfsprognose im Versorgungsbereich Sulzfeld genutzt.

### 3 Der Versorgungsbereich Sulzfeld- IST-Zustand

#### 3.1 Allgemeines

Der Versorgungsbereich Sulzfeld ist mit einer Wasserabgabe von 40 % der jährlichen Gesamtwasserabgabe des Verbandsgebietes der größte Versorgungsbereich der FWF. Das Trinkwasser für die ca. 110.000 Einwohner des Versorgungsbereiches wird auf die dazugehörigen Versorgungszonen: Neuhoof, Hüttenheim, Wolfsberg, Frankenberg, Sulzdorf und Landturm aufgeteilt. Der benachbarte Zweckverband FWM kann aus dem Versorgungsbereich Sulzfeld täglich bis zu 7.000 m<sup>3</sup> beziehen, was einer maximalen Jahresmenge von 2.555.000 m<sup>3</sup> entspricht. Weitere Abnehmer sind die Verbandsgemeinden. (Fernwasserversorgung Franken, 2015, S. 7; Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 56; wasserrechtliche Bewilligung, 1997, S. 2)

Schon seit Mitte der 50er Jahre betreibt die FWF das Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft. Durch eine Verschlechterung der Grundwasserqualität hinsichtlich ansteigender Salz-, Mangan-, Nitrat- und Pflanzenschutzmittel-Konzentrationen und einen wachsenden Wasserbedarf, wurde ein Sanierungskonzept erstellt, welches die nachfolgenden Grundsätze beinhaltet:

- Schutz des Grundwassers durch nachhaltige Bewirtschaftung – langfristige Versorgungssicherheit
- Grundwasseraufbereitung
- Mischung des Eigenwassers mit nitratarmen Fremdwasser.

Dieses Konzept war der Grundstein für den zusätzlichen Wasserbezug von dem benachbarten Zweckverband WFW. Der zweite Teil des Konzeptes sah eine Wasseraufbereitungsanlage für das Eigenwasser vor. So wurde zwischen 1989 und 1993 das Wasserwerk (WW) Sulzfeld gebaut (siehe Abbildung 5 (Krüger, 2016)).



Abbildung 5: WW Sulzfeld

Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt einen Übersichtsplan vom Standort „WW Sulzfeld“. Dieser beinhaltet das WW mit seinen zu- und wegführenden Brunnen- und Fernleitungen.

Dabei sind die Brunnenleitung (kommend vom Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft am Main) grün und die Fernleitungen blau dargestellt.

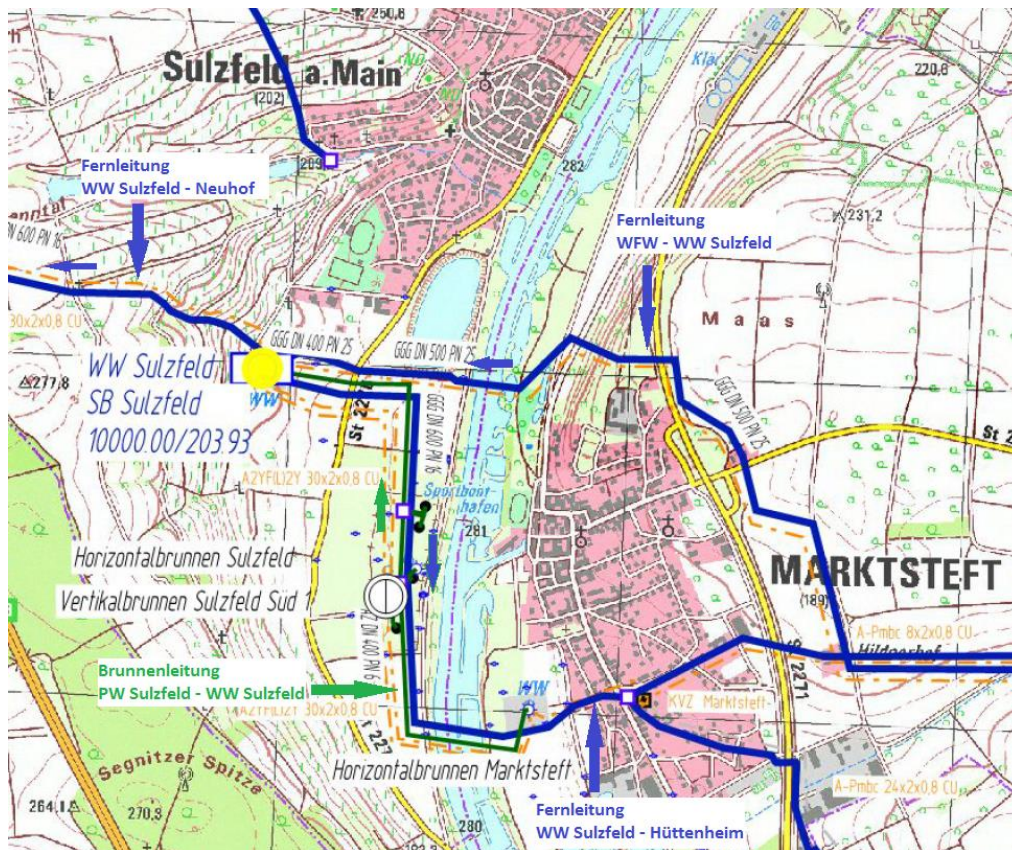


Abbildung 6: Übersichtsplan am Standort WW Sulzfeld (Brunnenleitung: grün; Fernleitung: blau)

Im WW wird das Rohwasser durch eine Belüftung in zwei geschlossenen Gleichstromoxidatoren, eine Filtration über sechs Kiesfilter in Form von Druckkesseln und eine abschließende Desinfektion mit Chlordioxid aufbereitet. Eine detaillierte Beschreibung der Aufbereitungstechnik im WW Sulzfeld wird in Abschnitt 3.4 vorgenommen.

Das aufbereitete Grundwasser wird mit dem kontinuierlich zufließenden Fremdwasser der WFW in Abhängigkeit vom Verbrauch gemischt. Die WFW liefert 250 L/s in Trinkwasserqualität an die FWF, was einem jährlichen Wasserbezug von 7.884.000 m³ entspricht. Die Übergabe erfolgt am Saugbehälter (SB) und Pumpwerk (PW) Hüttendorf. Bevor das Fremdwasser dem WW Sulzfeld zugeleitet wird, bezieht der Versorgungsbereich Hüttendorf 25 bis 55 L/s. Die verbleibenden 195 bis 225 L/s Fremdwasser werden zur Energieerzeugung über eine Turbine (siehe Abbildung 7 (Krüger, 2016)) geleitet und anschließend in einem statischen Mischrohr bei der Einspeisung zum SB mit zwei Kammern (Volumen: 10.000 m³) mit dem aufbereiteten Eigenwasser der FWF gemischt. (Fernwasserversorgung Franken, 2015, S. 7f; Fernwasserversorgung Franken, o. J., S. 1f)





Abbildung 7: Axialrad-Turbine am WFW-Zulauf

Bis September 2015 betrug das Mischungsverhältnis von Fremd- und Eigenwasser bei durchschnittlichem Wasserverbrauch 2:1 (WFW:FWF). Demnach wurden 210 L/s von der WFW und 105 L/s Eigenwasser miteinander gemischt. Bei einer Spitzenwasserentnahme veränderte sich das Mischungsverhältnis allerdings auf 1:2 (WFW:FWF), da sich der Fremdwasserzulauf aufgrund einer höheren Entnahme im Versorgungsbereich Hüttendorf verringerte und der Eigenwasseranteil durch eine drehzahlgeregelte Förderung auf bis zu 385 L/s zunahm. Seit September 2015 wird ein Mischungsverhältnis von 1:1 (WFW:FWF) bei durchschnittlichem Wasserverbrauch gefahren. Dabei bleibt die Mindesteinlaufmenge in den SB WW Sulzfeld gleich. Um dem Mischungsverhältnis gerecht zu werden, muss dementsprechend der Wassereinlauf von der WFW verringert werden. Somit bleiben der Einfluss auf den Grundwasserleiter, die Brunnenlaufzeiten und die Stillstandzeiten der Aufbereitungsanlage gleich. Allerdings ist eine Änderung der Programmierung für das Mischungsverhältnis und für den Turbinenbetrieb notwendig gewesen. Weiterhin führt das neue Mischungsverhältnis zu einem Anstieg der Wasserhärte, der Hydrogencarbonathärte, der Nitratkonzentration und der Sulfatkonzentration. (Konrad, 2015; Fernwasserversorgung Franken, 2015, S. 8; Rautenberg, 2016a)

Fünf Hochdruckpumpen fördern zwischen 315 und 580 L/s in die Haupthochbehälter des Versorgungsbereiches Sulzfeld: Neuhof (7.500/ 333) und Hüttenheim (3.000/ 293). Der Hochbehälter (HB) Neuhof wird drehzahlgeregelt mit 250 bis 380 L/s beschickt. Die Befüllung des HB Hüttenheim erfolgt hingegen zweistufig mit 170 bis 240 L/s. Zwischen dem PW Sulzfeld und dem HB Neuhof wird ein weiterer HB mit dem Mischwasser befüllt, der HB Landturm (3.000/ 293). (Fernwasserversorgung Franken, o. J., S. 1; Fernwasserversorgung Franken, 2015, S. 8)

Das Schema in Abbildung 8 (Gauff Ingenieure, 1992, S. 3) stellt die zuvor beschriebenen Fließabläufe im Versorgungsbereich Sulzfeld dar.

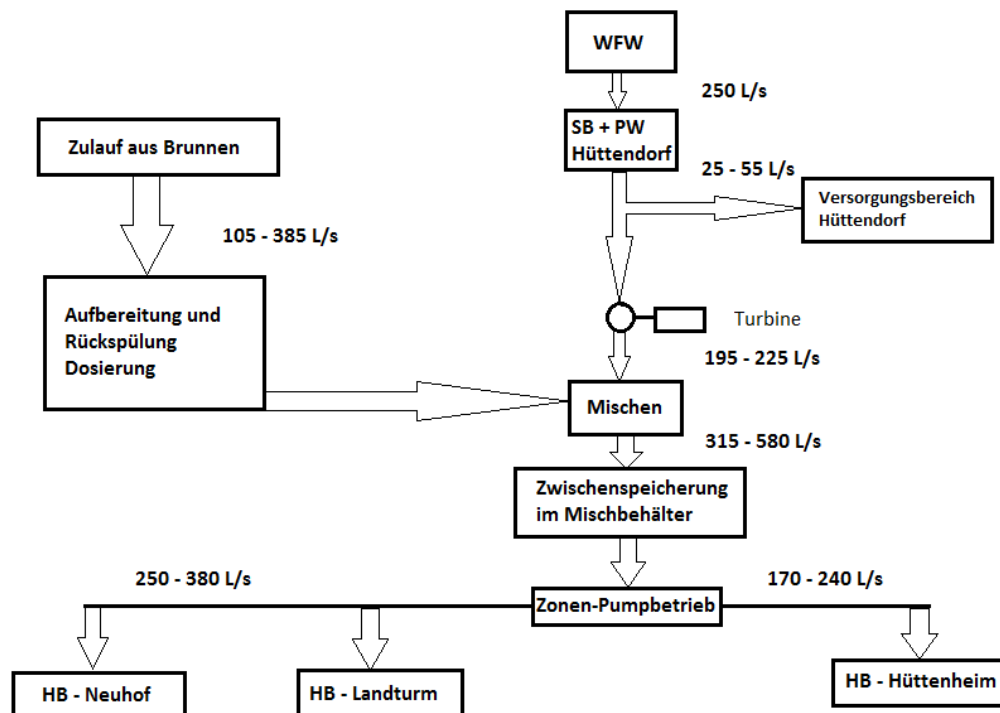


Abbildung 8: Fließschema für den Versorgungsbereich Sulzfeld

Die Notfallversorgung im Versorgungsbereich Sulzfeld sieht vor, dass beim Ausfall der Eigenwassergewinnung der Wasserbezug von der WFV auf maximal 285 L/s gesteigert werden kann. Damit kann der durchschnittliche Wasserverbrauch gedeckt werden, bei maximaler Wasserabgabe muss im nördlichen Versorgungsbereich Wasser aus dem Versorgungsbereich Volkach eingespeist werden. Weitere zusätzliche Bezugsmöglichkeiten bestehen aus dem Versorgungsbereich Elpersdorf. Ein Ausfall des Fremdwasserbezugs hat zur Folge, dass die Eigenwassergewinnung erhöht werden muss. Laut wasserrechtlicher Bewilligung kann diese für maximal drei Tage auf 385 L/s erhöht werden. Die Deckung eines überdurchschnittlichen Wasserverbrauchs ist damit gesichert. Spitzenverbrauchstage können nur durch einen Bezug aus den zuvor genannten Versorgungsbereichen gedeckt werden. (Fernwasserversorgung Franken, 2015, S. 9)

### 3.2 Wassergewinnung

Das Wasser aus der Eigengewinnung stammt aus sechs Brunnen im Maintal bei Sulzfeld und Marktstett. Vier Vertikalfilterbrunnen (S1; S2; N1; N2) und ein Horizontalfilterbrunnen (HS) (siehe Abbildung 9 (Krüger, 2016)) befinden sich rechtsseitig vom Main und ein Horizontalfilterbrunnen (HM) (siehe Abbildung 10 (Krüger, 2016)) befindet sich linksseitig vom Main.

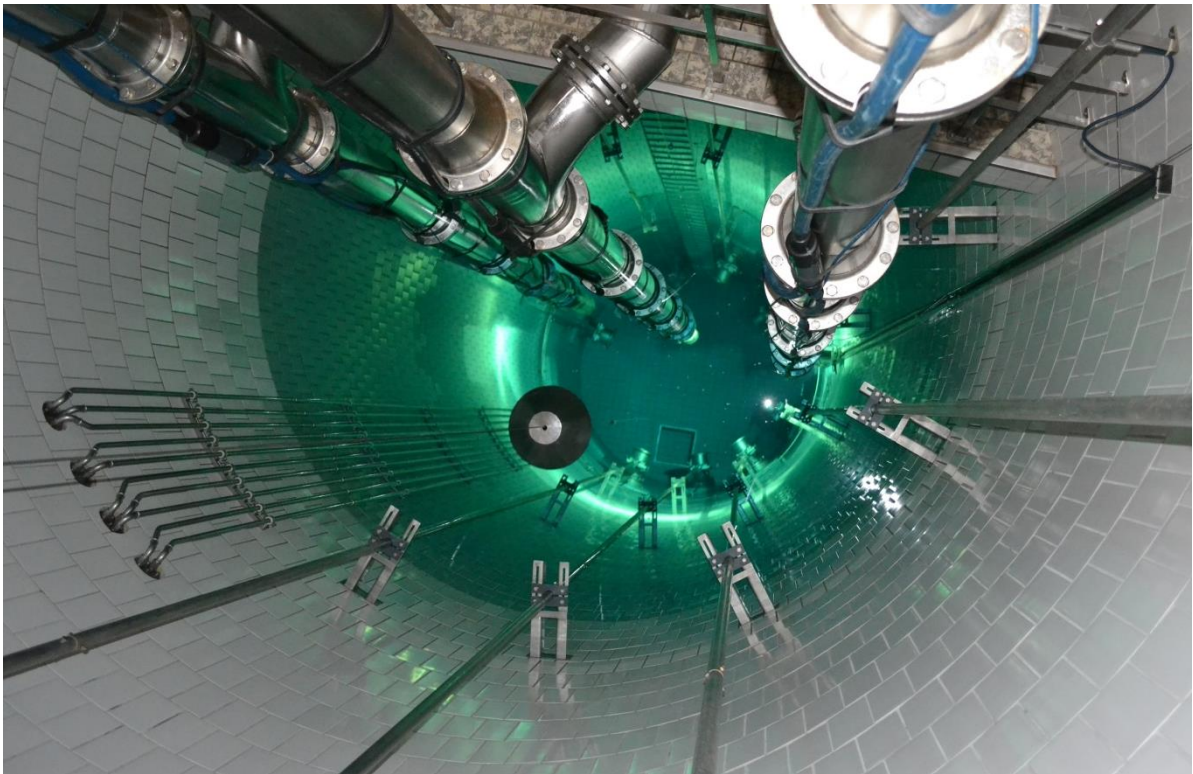


Abbildung 9: Horizontalfilterbrunnen Sulzfeld



Abbildung 10: Horizontalfilterbrunnen Marktsteft

Tabelle 6 zeigt eine Auflistung der wasserfördernden Brunnen im Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft. Die Tabelle stellt zum einen die maximale Förderleistung der einzelnen Brunnen in L/s dar und zum anderen die durchschnittliche Förderleistung der Brunnen von 2007 bis 2015 in m<sup>3</sup>/a, sowie deren prozentuale Verteilung. Der Horizontalfilterbrunnen am Standort Sulzfeld hat mit 26,5 % den größten Förderanteil, bezogen auf die durchschnittliche Jahresfördermenge, gefolgt vom Vertikalfilterbrunnen N1 mit 19,2 %. Grundsätzlich wird das Rohwasser aufgrund der Beschaffenheit entweder in der Mischung S1/HM/HS oder S2/N1/N2 gefördert. Durchschnittlich werden 51,6 % der geförderten Rohwassermenge aus den Brunnen S1/HM/HS und 48,4 % aus den Brunnen S2/N1/N2 entnommen.

Tabelle 6: wasserfördernde Brunnen im Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft

Standort	Brunnentyp- Bezeichnung	Max. Förder- leistung [L/s]	Durchschnittliche Fördermenge [m³/a]	Durchschnittlicher Förderanteil [%]
<u>Sulzfeld</u>	Horizontalfilter- brunnen HS	250	686.916	26,5
	Vertikalfilter- brunnen S1	45	277.155	10,7
	Vertikalfilter- brunnen S2	110	480.390	18,5
	Vertikalfilter- brunnen N1	110	497.643	19,2
	Vertikalfilter- brunnen N2	50	277.643	10,7
<u>Marktsteft</u>	Horizontalfilter- brunnen HM	140	374.100	14,4

### 3.2.1 Entnahmerechte

Die FWF darf laut wasserrechtlicher Bewilligung im Versorgungsbereich Sulzfeld über das gesamte Jahr kontinuierlich 206 L/s Grundwasser entnehmen. Eine Spitzenentnahme von 350 L/s darf nur über einen Zeitraum von bis zu sechs Wochen im Jahr gefördert werden, die höchste Spitze darf dabei 385 L/s<sup>1</sup> nicht übersteigen. Somit ist eine Gesamtentnahme von maximal 6,5 Mio. m³/a und 33.330 m³/d zulässig. Wie schon bereits aus Tabelle 2 ersichtlich, endet die wasserrechtliche Bewilligung zur Grundwasserentnahme im Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft am 31.12.2020. Zur weiteren Gewährleistung der Versorgungssicherheit ist eine zeitnahe Beantragung i. d. R. zwei bis drei Jahre vor Auslauf der Bewilligung notwendig. Daher muss im Voraus eine Überprüfung der zukünftig im Versorgungsgebiet Sulzfeld benötigten Wassermenge in Form einer Wasserbedarfsprognose erfolgen. (wasserrechtliche Bewilligung, 1997, S. 2)

### 3.2.2 Trinkwasserschutzgebiet

Die Beschaffenheit des Grundwassers ist vor Beeinträchtigungen und Verunreinigungen zum Wohl der Allgemeinheit zu schützen. Dazu werden Trinkwasserschutzgebiete festgesetzt, die die Nutzungen und Maßnahmen im Einzugsgebiet der WGA beschränken und/oder verbieten. (DVGW W 101 (A), 2006, S. 5)

Am 27. Februar 2004 hat das Landratsamt Kitzingen ein erweitertes Trinkwasserschutzgebiet für das Erschließungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft erlassen. Dieses besteht aus vier Fassungsbereichen (Zone I), zwei engeren Schutzzonen (Zone II) jeweils in der Gemarkung Sulzfeld und in der Gemarkung Marktsteft, sowie zwei weiteren Schutzzonen (Zone III) (siehe Anhang 1). Die Verordnung enthält Verbote und Handlungsbeschränkungen innerhalb der Schutzzonen. (Landratsamt Kitzingen, 2004, S. 2)

<sup>1</sup> nur an jeweils bis zu drei zusammenhängenden Tagen, insgesamt aber nur an bis zu 10 Tagen im Jahr erlaubt.



Das Wasserschutzgebiet umfasst die Schutzzone II mit 46 ha und die Schutzzone III mit 674 ha. Insgesamt beträgt die ausgewiesene Fläche somit 720 ha. (Löhner, 2015, S. 20)

### **3.2.3 Geologische und hydrogeologische Bedingungen**

Das Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft befindet sich im Maintal, 5 km südwestlich von Kitzingen. Der Fluss durchquert in diesem Bereich eine Platte aus Lettenkeuper und Oberem Muschelkalk.

Im Bereich der WGA Sulzfeld befindet sich eine Verwerfungszone, an deren Rand eine Absenkung der Scholle des Oberen Muschelkalks vorhanden ist. Durch Auslaugungsvorgänge im Mittleren Muschelkalk wird die Absenkung intensiviert und ein Nachbrechen des Oberen Muschelkalks verursacht. Im Bereich von Störungszonen, kann dies das Aufsteigen von Tiefenwassern mit hohen Calcium- und Sulfatkonzentrationen zur Folge haben, die den Salzgehalt des Grundwassers deutlich erhöhen. Die Quartärbasis liegt im Norden des Gewinnungsgebietes ca. 30 bis 35 m unter Gelände. Richtung Süden, im zentralen Bereich steigt sie um ca. 10 m auf, sinkt danach wieder auf ca. 30 m und steigt letztlich im Süden auf bis zu 8 m unter Gelände. Die Mächtigkeit der Deckschicht schwankt zwischen 1 und 3 m und setzt sich aus sandigen Lehmen zusammen. Im Bereich der Brunnen liegen die Deckschichten bei  $\geq 2,0$  m. (Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH, 2015, S. 13ff)

Der Main fließt im Bereich der WGA Sulzfeld-Marktsteft von Norden nach Süden und fungiert als Vorfluter für das Grundwasser. Die Grundwasserstände werden somit vom Main beeinflusst. Bei dem Rohwasser handelt es sich um ein Mischwasser aus dem Uferfiltrat des Mains und dem landseitigen Grundwasser (quartäres Grundwasser und Grundwasser aus dem Muschelkalk), das aus Norden und Westen den Brunnen zuströmt. Der Uferfiltratanteil kann bis zu 50 % betragen. Dadurch wird die Rohwasserqualität zum einen durch die Eigenschaften des Oberflächenwassers (Trübung, organische Spurenstoffe) und andererseits durch Grundwassereigenschaften, wie einen erhöhten Härtegrad, Nitrat- und Sulfatkonzentrationswert, einem geringen Sauerstoffgehalt und Spuren von Eisen gekennzeichnet. Die Anteile des Mischwassers schwanken in Abhängigkeit vom Niederschlag, Mainwasserstand und der Fördermenge. Eine Steigerung der Fördermenge hat einen Anstieg des Uferfiltratanteils zur Folge. Der Anhang 2 enthält einen hydrogeologischen Schnitt, der im Rahmen eines hydrogeologischen Gutachtens zur Erweiterung des Dargebotes für die WGA Sulzfeld auf Grundlage der Bohrprofile und Schichtenverzeichnisse der Grundwassermessstellen und Brunnen erstellt wurde. (Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH, 2015, S. 18f; Rautenberg, 2016)

## **3.3 Wasserlieferungsverträge**

Für den Versorgungsbereich Sulzfeld existieren derzeit noch drei Wasserlieferungsverträge mit benachbarten Zweckverbänden. Diese werden nachfolgend kurz erläutert.

### **3.3.1 Wasserbezug**

Der Fremdwasserbezug im Versorgungsbereich Sulzfeld erfolgt von der WFW, dabei liegen zwei Verträge vor.

Der erste Vertrag trat am 19.11.1979 in Kraft und ist noch bis zum 31.12.2023 gültig. Der Vertrag beinhaltet als tägliche Höchstmenge eine Wasserlieferung von 8.640 m<sup>3</sup>, was 100 L/s und 3.153.000 m<sup>3</sup>/a entspricht. Der Abnehmer ist laut Vertrag dazu verpflichtet jeden Tag eine Mindestmenge von 20 % zu beziehen. Das kommt einer täglichen Wassermenge von 1.728 m<sup>3</sup> gleich, also 20 L/s. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 55; Wasserlieferungsvertrag, 1979)

Der zweite Vertrag wurde am 29.12.1989 abgeschlossen und ist bis zum 31.12.2020 gültig. Durch eine nachträgliche Vereinbarung zur Laufzeitverlängerung des Vertrages wurde festgelegt, dass der Wasserlieferungsvertrag am 31.12.2023 endet. Der Vertrag sieht eine Lieferung von höchstens 12.960 m<sup>3</sup>/d vor, das gleicht einer jährlichen Menge von 4.730.400 m<sup>3</sup>, also 150 L/s. Die vereinbarte Mindestmenge beträgt auch in diesem Vertrag 20 % und entspricht somit einer Menge von 2.592 m<sup>3</sup>/d, demnach 30 L/s. (Vereinbarung, 2007/2008; Wasserlieferungsvertrag, 1989)

Der Übergabepunkt für die insgesamt maximal 250 L/s ist der SB und das PW Hüttendorf mit einer Höhenlage von 331,0 m ü. N. N.. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012, S. 56)

### **3.3.2 Wasserabgabe**

Seit dem 07.12.2010 existiert ein Wasserlieferungsvertrag zwischen der FWM und der FWF, der die Lieferung einer täglichen Wassermenge von 7.000 m<sup>3</sup> vorsieht, das entspricht 81 L/s bzw. 2.555.000 m<sup>3</sup>/a. Der Abnehmer verpflichtet sich zu einer Mindestabnahme von 20 %, also 16 L/s. Die Übergabe der Wasserlieferung erfolgt am HB Neuhof. Der Vertrag endet zum 31.12.2016. (Wasserlieferungsvertrag, 2010) Derzeitige Verhandlungen laufen voraussichtlich auf einen zukünftigen Wasserlieferungsvertrag mit einer Tagesbestellmenge von 5.000 m<sup>3</sup>/d hinaus. (Fernwasserversorgung Franken, 2016b)

Ein weiterer Wasserlieferungsvertrag zwischen der FWM und der FWF existierte für den Gemeindeteil Fuchsstadt der Gemeinde Reichenberg und den Stadtteil Rottenbauer der Stadt Würzburg. Die dort befindlichen Leitungen waren bis einschließlich 31.12.2015 im Besitz der FWM, die Wasserlieferung erfolgte allerdings durch die FWF. Durch eine Übernahme der Anlagenteile seitens der FWF zum 01.01.2016 gehören die genannten Ortsteile nun offiziell zum Versorgungsbereich Sulzfeld. Der am 01.01.1995 in Kraft getretene Vertrag zwischen FWM und FWF endete damit am 31.12.2015. (Wasserlieferungsvertrag, 1995; Rautenberg, 2016)

### 3.4 Das Wasserwerk Sulzfeld

Die bestehende Wasseraufbereitungsanlage Sulzfeld ist auf einen maximalen Volumenstrom von 385 L/s ausgelegt. Im Normalfall wird die Anlage mit 160 L/s etwa 20 h im Winter und 23 h im Sommer betrieben. (Konrad, 2016)

Im WW Sulzfeld werden die Wasser aus den eigenen Brunnen (siehe Abschnitt 3.2) im Maintal bei Sulzfeld und Marktsteft aufbereitet. Das Rohwasser dieser Brunnen ist durch eine hohe Härte (5,87 mmol/L) geprägt. Weiterhin weisen Nitrat mit durchschnittlich 36 mg/L und Sulfat mit durchschnittlich 240 mg/L eine recht hohe Konzentration auf. Die Eisen- (0,003 mg/L) und Mangan- (0,006 mg/L) Konzentrationen fallen relativ gering aus. Das erschlossene Grundwasser ist sauerstoffarm. Eine detaillierte Beschreibung der Rohwasserqualität erfolgt in Abschnitt 3.6.1. (Müller, 2015, S. 1)

Die Aufbereitungsanlage besteht aus den folgenden Anlagenteilen:

- zwei geschlossene Füllkörper-Oxidatoren (Ø 3.000 mm; zylindrische Mantelhöhe: 2.500 mm)
- sechs geschlossene Einschicht-Quarzsandfilter (Ø 4.200 mm; zylindrische Mantelhöhe: 2.500 mm)
- bedarfsweise Desinfektion mit Chlordioxid
- Mischbehälter (Saugbehälter;  $I_{\text{Nutz}} = 2 \times 5.000 \text{ m}^3$ )
- Phosphat-Dosierung

Abbildung 11 (Krüger, 2016) zeigt die Oxidatoren und einen Teil der Einschichtfilter.



Abbildung 11: Oxidatoren und Einschichtfilter WW Sulzfeld

Die Luftmischer sind mit sogenannten Kunststoff-Hochleistungsfüllkörpern gefüllt, die der Vergrößerung der Wirkungsfläche dienen. Mittels Kolbenkompressoren wird den Oxidatoren die Druckluft zugeführt. Das Rohwasser wird in den Luftmischern mit Sauerstoff angereichert, was eine Oxidation der Mangan- und Eisenverbindungen bewirkt, sodass sie in eine abfiltrierbare Form gebracht werden. Die Filtration erfolgt in den nachgeschalteten Einschicht-Quarzsandfiltern. Diese bewirken nicht nur die Abtrennung

der Eisen- und Manganbestandteile, sondern auch soweit es möglich und notwendig ist eine Trübstoffabscheidung. Über ein statisches Mischrohr erfolgt die Einspeisung des Eigenwassers und des Wassers der WFW in den Mischbehälter mit zwei Kammern (siehe Abbildung 12 (Krüger, 2016)). (Heix, 1991, S. 3)



Abbildung 12: statischer Mischer vor SB WW Sulzfeld

Der Mischbehälter weist ein Volumen von zweimal 5.000 m<sup>3</sup> auf. Eine Sicherheitsdesinfektion des Trinkwassers erfolgt durch eine Chlordioxid-Dosierung in der Zuleitung zum Mischbehälter und ggf. auch auf der Saugseite der Hochdruckpumpen. Das Chlordioxid wird in einer externen Anlage aus Chlorgas und Natriumchlorit hergestellt. Als Korrosionsinhibitor wird dem Reinwasser in die Netzpumpen Phosphat zudosiert in einer Dosis von 1,3 bis 1,5 mg/L. (Heix, 1991, S. 3; INSUMMA - SHP - Pfenning, 2005, S. 14; Müller, 2015, S. 1)

Das Wasser wird über fünf Netzpumpen in das Versorgungsnetz eingespeist (siehe Abbildung 13 (Krüger, 2016)). Zwei Pumpen fördern in Richtung Neuhof, zwei weitere Pumpen fördern in Richtung Hüttenheim und eine Pumpe kann je nach Bedarf in eine der beiden Richtungen geregelt werden. Die Einleitung in das Netz Neuhof erfolgt dabei mit 25 bar und in das Netz Hüttenheim mit 16 bar. Damit eine stabile Druckversorgung gewährleistet ist, sind insgesamt vier Druckstoßbehälter mit zwei Kompressoren eingebaut. (Heix, 1991, S. 3)



Abbildung 13: Maschinenhalle WW Sulzfeld mit Netzpumpen, Druckstoßausgleichsbehältern und Spülluftgebläse

Die Kiesfilter werden in regelmäßigen Abständen mit einem Luft-Wasser-Gemisch gespült. Dafür sind zwei Spülwasserpumpen und zwei Spülluftgebläse vorgesehen. Das Schlammwasser wird zu einem Absetzbecken mit einem Volumen von 150 m<sup>3</sup> geleitet. Eine optimale Sedimentation sollte durch eine Flockungsmittel- und Flockungshilfsmittel-Dosierung gewährleistet werden. Diese Dosierung fand jedoch nie statt, da der Schlamm sehr gute Sedimentationseigenschaften vorweist. Das Klarwasser aus dem Überlauf wird in den Vorfluter eingeleitet. Der eingedickte Schlamm wurde bislang in die öffentliche Kanalisation eingeleitet, was seitens des örtlichen Abwasserunternehmens nicht mehr gewünscht ist. Derzeit wird nach einer alternativen Recycling- bzw. Entsorgungsmöglichkeit gesucht. (Heix, 1991, S. 3; INSUMMA - SHP - Pfenning, 2005a; Konrad, 2016)

Aus dem Anhang 3 kann das zugehörige R&I-Schema der Anlage entnommen werden. Es zeigt die bestehende Verfahrenstechnik der Aufbereitungsanlage.

### 3.4.1 Untersuchungen zu alternativen Aufbereitungsverfahren

Nachdem das Wasserstraßen-Neubauamt Aschaffenburg im Jahr 2004 die FWF über eine beabsichtigte Ausbaumaßnahme der Bundeswasserstraße Main im Bereich der Stauhaltung Marktbreit und Kitzingen unterrichtete, wurde aufgrund befürchteter negativer Auswirkungen auf die Wassergewinnung Sulzfeld-Marktsteft eine hydrogeologische Stellungnahme beauftragt. Das Gutachten der Technologieberatung Grundwasser und

Umwelt GmbH (TGU) stellte fest, dass der Betrieb der eigenen Brunnen die Grundlage für eine sichere Wasserversorgung im Versorgungsbereich Sulzfeld ist. Durch den Mainausbau wird die Kolmationsschicht des Flusses innerhalb des Einzugsgebietes der Gewinnung Sulzfeld-Marktsteft teilweise vollständig entfernt. Damit sind Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität zu befürchten, denn die Flachbrunnen in Sulzfeld und Marktsteft befinden sich in unmittelbarer Nähe zum Main und das Rohwasser besteht anteilig aus Uferfiltrat. Das Gutachten kam zu dem Schluss, dass eine Aktivkohlefiltration zur Bindung der organischen Verunreinigungen ggf. mit vorheriger Ozonbehandlung zur Bildung niedermolekularer, biologisch gut abbaubarer Substanzen als zusätzliche Wasseraufbereitungsmaßnahme im WW Sulzfeld anzuraten ist. Daraufhin bewilligte der Werkausschuss die Planung zur Untersuchung verschiedener Aufbereitungsvarianten. Da es bzgl. der finanziellen Beteiligung des Wasserstraßen-Neubauamtes an der Aufbereitungsanlage zu keiner Einigung kam, reichte die FWF Klage gegen den Planfeststellungsbeschluss zum Mainausbau ein. Die Klage wurde 2009 abgewiesen mit der Begründung, dass kein ausreichend hohes Gefährdungspotential für die Trinkwasserversorgung erkannt werden kann. Auch nach Abschluss des Fahrrinnenausbaus konnten keine Rohwasserbeeinträchtigungen festgestellt werden, was für eine große Schutzwirkung der Bodenpassage im Erschließungsgebiet spricht. (Werkausschuss, 2004, S. 1; Werkausschuss, 2010, S. 1f)

Dennoch wurde die Planung zur Aufbereitung im WW Sulzfeld im Jahr 2009 wieder aufgenommen, da zu diesem Zeitpunkt die Änderung der Trinkwasserverordnung mit einem zweiten Entwurf konkretisiert wurde. Folgende neue Erkenntnisse konnten zwischen 2005 und 2009 gewonnen werden:

- Bei einer Ozonbehandlung verwandelt sich das Pflanzenschutzmittel-abbauprodukt N, N-Dimethylsulfamid (DMS) (nicht gesundheitsschädlich) in das als gesundheitsschädlich einzustufende N, Nitroso-Dimethylamin (NDMA). Im Rohwasser der Brunnen in Sulzfeld konnte DMS nachgewiesen werden.
- Weiterhin enthält das Rohwasser das nicht gesundheitsschädliche Bromid, welches bei einer Ozonbehandlung zum gesundheitsschädlichen Bromat reagiert.
- Die Entfernung von relevanten Kontaminanten wurde im Jahr 2005 bei der Planung der Erweiterung der Aufbereitungsanlage Sulzfeld nicht berücksichtigt. Zu diesem Zeitpunkt wurde aber die Einführung eines Grenzwertes bei der Überarbeitung der Trinkwasserverordnung diskutiert. (Werkausschuss, 2010, S. 1)

Anschließend intensive Untersuchungen brachten das Ergebnis, dass:

- die geplante Erweiterung der Aufbereitungsanlage Sulzfeld mit Ozon und Aktivkohle nicht sicherstellen kann, dass bei sämtlichen Betriebsbedingungen im Trinkwasser die Grenzwerte für Bromat und NDMA eingehalten werden.



- bei oxidativen Verfahren, wie der Ozonbehandlung, Abbauprodukte entstehen können, deren Wirkung auf die menschliche Gesundheit bisher nicht ausreichend abgeschätzt werden kann.
- eine Entfernung von relevanten Kontaminanten durch das geplante Verfahren nicht in ausreichendem Maße erfüllt wird. (Werkausschuss, 2010, S. 2)

Daher wurde beschlossen das geplante Aufbereitungsverfahren mit Ozonbehandlung und Aktivkohlefiltration zu verwerfen. Zum damaligen Zeitpunkt wurde auf ein alternatives Aufbereitungsverfahren, die Membranfiltration verwiesen. Das Verfahren stand jedoch noch am Anfang der Entwicklung und entsprach nicht dem Leitbild der Wasserversorgung, einen möglichst naturnahen Zustand des Lebensmittels Trinkwasser beizubehalten. (Werkausschuss, 2010, S. 2)

2010 beschloss der Werkausschuss, dass die Planung und der Bau einer weitergehenden Aufbereitungsanlage im WW Sulzfeld erst wieder aufgegriffen wird, „wenn:

1. *erhöhte Anforderungen aus einer überarbeiteten Trinkwasserverordnung dies erfordern,*
2. *neue, konkrete Gefährdungen aus der Beeinflussung des Rohwassers durch den Main zu erwarten sind,*
3. *neue oder verbesserte Aufbereitungsverfahren für das in Sulzfeld/Marktsteft geförderte Rohwasser zur Verfügung stehen.“*  
(Werkausschuss, 2010, S. 3)

In den nachfolgenden Abschnitten 3.5 und 3.6 wird die aktuelle quantitative und qualitative Situation im Versorgungsbereich Sulzfeld dargestellt.

### **3.5 Wassermengenbilanz**

Innerhalb der Bestandsanalyse wurde eine Wassermengenbilanz für das Verbandsgebiet der FWF und für den Versorgungsbereich Sulzfeld erstellt. Dabei wurden die Wassergewinnungs-, Wasserbezugs- und Wasserabgabedaten der letzten 11 Jahre, von 2005 bis 2015, herangezogen.

Die Wassermengenbilanz besteht sowohl für das Verbandsgebiet der FWF als auch für den Versorgungsbereich Sulzfeld, aus dem Wasserdargebot, das sich aus Fremdwasserbezug und Eigenwassergewinnung zusammensetzt und der nutzbaren Wasserabgabe, unterteilt in die Abgabe an die FWM und die Abgabe im FWF-Gebiet. Die Differenz von Wasserdargebot und –abgabe ergibt den Eigenbedarf, die Verluste und Messfehler.

#### **3.5.1 Wassermengenbilanz im Versorgungsbereich Sulzfeld**

Das Wasseraufkommen im Versorgungsbereich Sulzfeld setzt sich aus der Eigengewinnung im Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft und dem Fremdbezug aus dem Verbandsgebiet der WFW zusammen. Die angegebenen Daten beziehen sich

jeweils auf den Zulauf zum Mischbehälter im WW Sulzfeld und entstammen den Jahresberichten der Betriebsdatenprotokolle.

Auf der Seite der nutzbaren Wasserabgabe wird zwischen der Abgabe an den Zweckverband FWM und der Abgabe an die Kunden im Versorgungsbereich Sulzfeld unterschieden. Die Daten zu den angegebenen Wassermengen wurden aus den Jahresabrechnungen der Finanzverwaltung der FWF für die Jahre 2005 bis 2015 entnommen. Die Differenz zwischen Gesamtaufkommen und nutzbarer Wasserabgabe ergibt den Eigenbedarf, die Verluste und Messfehler im Versorgungsbereich Sulzfeld. Die bilanzierten, jährlichen Wassermengen sind in Tabelle 7 dargestellt. Zusätzlich enthält die Tabelle die zugelassenen maximalen jährlichen Entnahmemengen nach der wasserrechtlichen Bewilligung für das Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft. Ein Vergleich der gewonnenen Wassermengen von 2005 bis 2015 mit den maximalen Entnahmerechten zeigt, dass in der Vergangenheit durchschnittlich nur 42 % der eigenen Reserven genutzt wurden. Der jährliche Gesamtwasserbedarf enthält durchschnittlich 35,5 % Eigenwasser. Im Jahr 2015 konnte der Anteil des Eigenwassers auf 38,3 % erhöht werden, da zum Ende des Jahres das Mischungsverhältnis der Wasser verändert wurde.

Tabelle 7: Wassermengenbilanz im Versorgungsbereich Sulzfeld

Jahr [Mio. m³/a]	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Eigengewinnung (Zulauf SB WW Sulzfeld)	3,102	3,082	2,778	2,615	2,484	2,660	2,468	2,525	2,265	2,384	2,992
Fremdbezug (WFW)	5,070	5,001	4,924	4,767	4,821	4,723	4,916	4,882	4,542	4,761	4,828
Gesamtaufkommen	<b>8,172</b>	<b>8,081</b>	<b>7,702</b>	<b>7,382</b>	<b>7,306</b>	<b>7,383</b>	<b>7,384</b>	<b>7,407</b>	<b>6,807</b>	<b>7,145</b>	<b>7,819</b>
max. Entnahmerechte	6,0	6,0	6,0	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
nutzbare Wasserabgabe	<b>8,099</b>	<b>8,015</b>	<b>7,628</b>	<b>7,288</b>	<b>7,158</b>	<b>7,244</b>	<b>7,269</b>	<b>7,326</b>	<b>6,692</b>	<b>6,956</b>	<b>7,740</b>
Abgabe FWM	2,365	2,357	2,146	1,974	1,880	1,969	1,930	1,852	1,524	1,751	2,249
Abgabe Versorgungsbereich Sulzfeld	5,734	5,658	5,482	5,313	5,278	5,275	5,339	5,474	5,168	5,205	5,491
Eigenbedarf, Verluste, Messfehler	0,073	0,068	0,073	0,094	0,148	0,139	0,115	0,082	0,115	0,189	0,079

Die Ergebnisse aus Tabelle 7 sind in Abbildung 14 grafisch dargestellt. Die Abbildung enthält die Wassermengen in m³/a von 2005 bis 2015. Die rote Linie mit Datenpunkten stellt die nutzbare Wasserabgabe dar und die dunkelblaue Linie das Gesamtaufkommen. Die abgabestärksten Jahre im Versorgungsbereich Sulzfeld waren die Jahre 2005 und 2006 mit 8,1 Mio. m³/a bzw. 8,0 Mio. m³/a. Das abgabeschwächste Jahr war 2013 mit 6,7 Mio. m³/a. Für das Jahr 2015 konnte ein erneuter Anstieg auf 7,7 Mio. m³/a verzeichnet werden. Neben einer erhöhten Abgabe aufgrund von Trockenheit, hat die FWF seit 01.01.2015 die technische Betriebsführung der FWM inne, deren Wasserbezug sich zeitgleich erhöhte. Die Linien von Gesamtaufkommen und nutzbarer Wasserabgabe



verlaufen nicht in gleichem Abstand zueinander. Damit sind Eigenbedarf, Verluste und Messfehler nicht konstant gleichbleibend, sie schwanken zwischen 0,8 und 2,6 %.

Die Wasserabgabe an die Kunden im Versorgungsbereich Sulzfeld (violett), die Wasserabgabe an die FWM (grün), die Eigengewinnung (blau) und der Fremdwasserbezug (braun) sind unterhalb der Linien als Säulen dargestellt. Wie auch schon in Tabelle 7 festgestellt werden konnte, liegt der Fremdwasserbezug vom Zweckverband WFW deutlich über der Eigenwassergewinnung.

Bei näherer Betrachtung der Wasserabgabe im Versorgungsbereich Sulzfeld wird deutlich, dass die Abgabe an die FWM (grüne Säule) beinahe 30 % der Gesamtabgabe ausmacht. Das Wasser wird an der Übergabestelle Neuhoof an die FWM abgegeben. Das heißt, dass 30 % der Gesamtabgabe im Versorgungsbereich an einer Stelle, nämlich der Übergabestelle Neuhoof, abgegeben werden. Eine veränderte Wasserabnahme seitens der FWM könnte die gesamte Wassermengenbilanz verschieben. Somit ist die FWM der bedeutendste Abnehmer im Versorgungsbereich Sulzfeld.

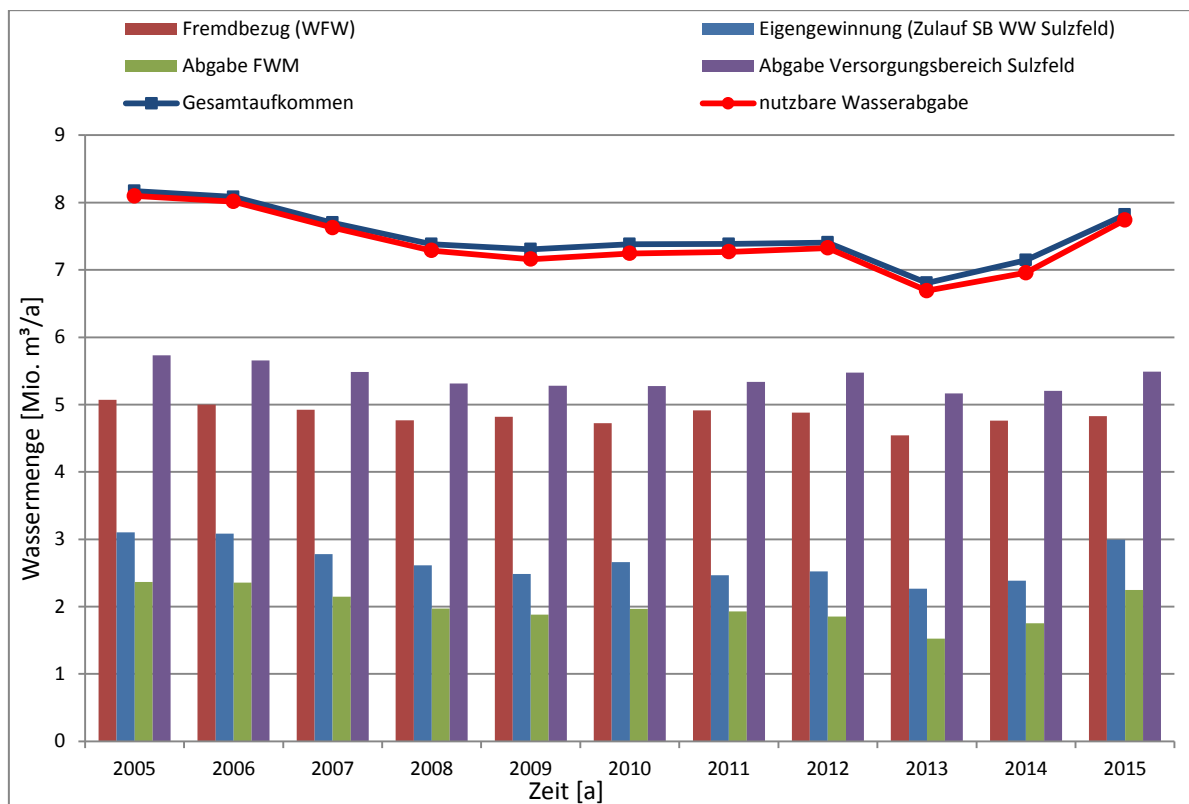


Abbildung 14: Grafische Darstellung der Wassermengenbilanz im Versorgungsbereich Sulzfeld

Ein Vergleich der Wassermengenbilanz des Versorgungsbereiches Sulzfeld mit dem gesamten Verbandsgebiet der FWF (siehe Tabelle 8) zeigt, dass im Versorgungsbereich Sulzfeld durchschnittlich:

- 37,4 % des gesamten Eigenwassers gewonnen werden
- 48,3 % des gesamten Fremdwassers bezogen werden
- 43,8 % des Gesamtaufkommens anfallen
- 44,1 % der nutzbaren Gesamtwasserabgabe abgegeben werden
- 36,5 % der Abnehmer aus dem Verbandsgebiet ihr Wasser erhalten.

Im Jahr 2015 verfügte der Versorgungsbereich Sulzfeld über 53,8 % der maximal bewilligten Entnahmemengen im Verbandsgebiet. Die Wasserabgabe an die FWM macht, bezogen auf das Verbandsgebiet, 11,9 % der nutzbaren Gesamtwasserabgabe aus.

Diese Zahlen untermauern die Bedeutung des Versorgungsbereiches Sulzfeld für das Verbandsgebiet der FWF.

Tabelle 8: Wassermengenbilanz im Verbandsgebiet der FWF

Jahr [Mio. m³/a]	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Eigengewinnung (Eingang WW / Behälter)	7,476	7,509	7,092	6,869	6,791	7,116	6,841	7,099	6,742	7,021	7,744
Fremdbezug (BRW, RGB, WFW)	10,612	10,426	10,220	9,999	9,805	9,619	9,911	10,125	9,458	9,897	10,265
<b>Gesamtauf- kommen</b>	<b>18,088</b>	<b>17,935</b>	<b>17,312</b>	<b>16,869</b>	<b>16,597</b>	<b>16,735</b>	<b>16,752</b>	<b>17,225</b>	<b>16,199</b>	<b>16,918</b>	<b>18,009</b>
max. Entnahmerechte	11,939	11,109	11,109	11,609	11,609	11,609	11,889	11,889	11,889	12,089	12,089
<b>nutzbare Wasserabgabe</b>	<b>17,726</b>	<b>17,736</b>	<b>16,957</b>	<b>16,429</b>	<b>16,284</b>	<b>16,331</b>	<b>16,475</b>	<b>16,850</b>	<b>15,865</b>	<b>16,337</b>	<b>17,578</b>
Abgabe FWM	2,365	2,358	2,146	1,974	1,880	1,969	1,930	1,852	1,524	1,751	2,249
Abgabe FWF- Gebiet	15,361	15,378	14,811	14,455	14,404	14,362	14,545	14,998	14,341	14,587	15,329
Eigenbedarf, Verluste, Messfehler	0,362	0,199	0,355	0,440	0,312	0,404	0,278	0,375	0,334	0,581	0,430

### 3.5.2 Spitzenbedarf

Für die Planung von Wasseraufbereitungsanlagen ist die Ermittlung der Anlagenkapazität entscheidend. Die bestehende Wasseraufbereitungsanlage Sulzfeld wurde auf eine technische Aufbereitungskapazität von 385 L/s ausgelegt, derzeit besteht jedoch ein verfahrenstechnischer Sanierungsbedarf, sodass die Anlage nur mit max. 365 L/s beschickt werden kann. Im Normalfall wird die Anlage mit 160 L/s etwa 20 h im Winter und 23 h im Sommer betrieben. (Konrad, 2016)

Weitere 225 L/s können dem WW von der WFW zufließen. Dieses Wasser wird in Trinkwasserqualität geliefert und muss nur noch mit dem Eigenwasser gemischt werden. Das WW Sulzfeld versorgt den gesamten Versorgungsbereich Sulzfeld, demnach ist die Anlage, sowohl für den Tagesspitzen- als auch für den Jahreswasserbedarf im Versorgungsbereich ausgelegt. Im Abschnitt 3.5.1 erfolgte bereits die Ermittlung des Jahreswasserbedarfs im Rahmen der Wassermengenbilanzierung. In diesem Abschnitt soll der Tagesspitzenbedarf ermittelt werden.

Da die Abrechnungsdaten der Finanzverwaltung für die nutzbare Wasserabgabe nur Monatsmengen beinhalten, werden zusätzlich die Tages- und Monatsabgaben der Netzeinspeisung aus den Betriebsdatenprotokollen hinzugezogen. Diese beinhalten jedoch den Wasserwerkseigenbedarf und die Wasserverluste.

Die Daten werden im Box-Whisker-Diagramm, kurz Boxplot genannt, dargestellt, das sowohl die Darstellung der Spitzenwerte als auch der Verteilungsstatistik ermöglicht. Ein Boxplot besteht aus einer Box, die 50 % der verteilten Daten enthält. Sie wird unterhalb vom 25 %-Quartil und oberhalb vom 75 %-Quartil begrenzt. Die waagerechte Linie innerhalb der Box kennzeichnet den Median. Die von der Box nach oben und unten abgehenden „Antennen“, auch Whisker genannt, kennzeichnen die Maximal- und Minimalwerte innerhalb der Verteilung. Die Whisker sollten allerdings in ihrer Länge nicht den 1,5-fachen Interquartilsabstand (Differenz zwischen 75 %-Quartil und 25 %-Quartil) überschreiten. Ist dies der Fall wird der höchste noch innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes liegende Wert als Maximalwert und der kleinste noch innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes liegende Wert als Minimalwert festgelegt. Alle außerhalb dieses Bereiches liegenden Werte werden als sogenannte „Ausreißer“, in Form von Punkten eingezeichnet. Kleine Boxen weisen auf eine geringe Streuung der Daten hin, das heißt, dass über das gesamte Jahr eine weitestgehend gleiche Menge an Wasser abgegeben wird. Große Boxen hingegen veranschaulichen große Streuungen. Demnach unterscheiden sich die Wasserabgaben stark voneinander. (Keller, 2013)

Abbildung 15 stellt die Monatszulaufwerte zum SB WW Sulzfeld, bestehend aus dem Wasser der Eigengewinnung und dem Fremdwasser der WFW, von 2005 bis 2015 dar. Die Daten stammen aus den Betriebsdatenprotokollen der FWF. Die Medianwerte liegen zwischen 674.926 m<sup>3</sup>/Monat (2005) und 559.148 m<sup>3</sup>/Monat (2013). Die kleinste Netzeinspeisung als Minimalwert trat im Jahr 2010 auf und beträgt 532.637 m<sup>3</sup>/Monat (Februar). Den größten Maximalwert erreichte das Jahr 2005 im Mai mit 734.617 m<sup>3</sup>/Monat. Der höchste Ausreißer wurde im Juli 2006 mit 841.236 m<sup>3</sup>/Monat erzielt. Die Maximalwerte der anderen Jahre zeigen, dass ein solcher Wert nicht maßgebend ist. Zu diesem Zeitpunkt, im Juli 2006, traten besonders hohe Temperaturen auf, damit lässt sich die hohe Netzeinspeisung begründen. Weiterhin haben die Jahre 2006 und 2008 eine größere Streuung als die anderen Jahre.

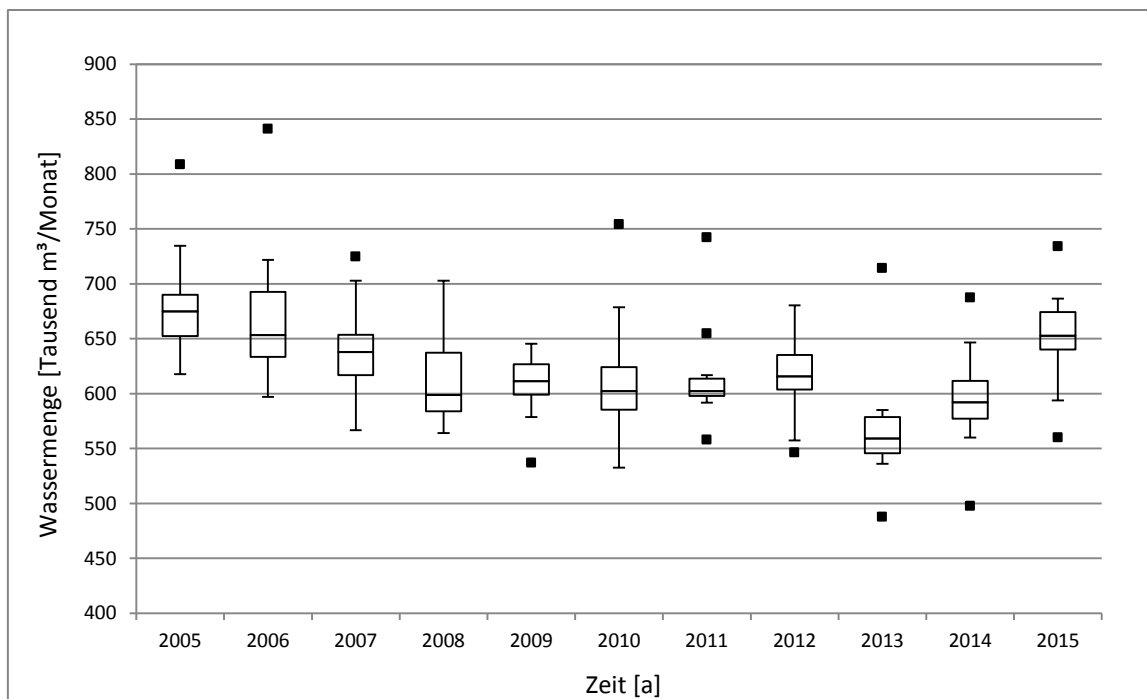


Abbildung 15: Monatszulaufwerte zum SB WW Sulzfeld (Eigengewinnung und WFW) von 2005 - 2015 [m³/Monat] als Boxplot

Die Abbildung 16 stellt den täglichen Wasserzulauf, bestehend aus Eigenwasser und Fremdwasser zum SB WW Sulzfeld dar von 2005 bis 2015. Die Daten konnten aus den Monatsberichten der Betriebsdatenprotokolle ermittelt werden. Die Medianwerte der letzten 10 Jahre variieren zwischen 18.323 m³/d (2013) und 22.045 m³/d (2005). Die jährlichen Streuungen der Tagesnetzeinspeisungen gleichen im betrachteten Zeitraum von 11 Jahren einander. Der minimale Spitzenwert wurde 2013 erreicht mit 13.747 m³/d, der maximale Spitzenwert wurde hingegen im Jahr 2006 mit 27.809 m³/d erfasst.

Die Abbildung 15 und Abbildung 16 stellen ausschließlich die Zulaufdaten zum SB WW Sulzfeld dar. Diese beinhalten den Wasserwerkseigenverbrauch und die Wasserverluste. Die nutzbare Wasserabgabe hingegen berücksichtigt nur die tatsächlich gemessene und abgerechnete Wasserlieferung an den Abnehmer.

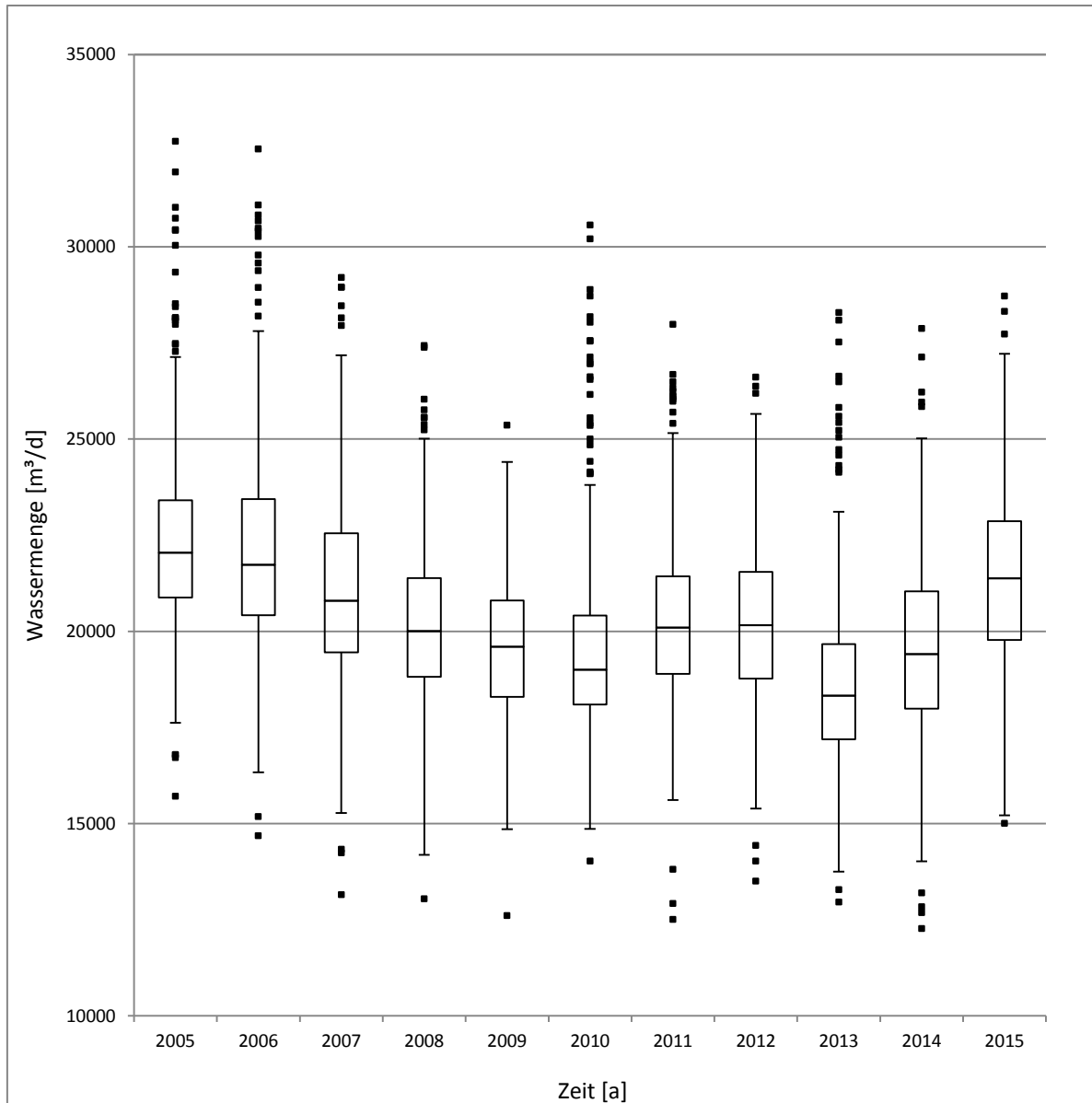


Abbildung 16: Tageszulaufwerte zum SB WW Sulzfeld (Eigengewinnung und WFW) von 2005 - 2015 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] als Boxplot

Das nachfolgende Box-Whisker-Diagramm beinhaltet die tatsächlich abgerechnete Wasserabgabe von 2005 bis 2015 in  $\text{m}^3/\text{Monat}$  (Vgl. Abbildung 17). Der kleinste Spitzenwert konnte im Jahr 2010 mit  $525.135 \text{ m}^3/\text{Monat}$  (Februar) ermittelt werden. Sowohl der maximale Ausreißer als auch der Maximalwert der letzten 11 Jahre sind im Jahr 2006 zu finden mit  $833.941 \text{ m}^3/\text{Monat}$  (Juli) bzw.  $750.279 \text{ m}^3/\text{Monat}$  (Mai). Die Medianwerte liegen zwischen  $656.272 \text{ m}^3/\text{Monat}$  (2005) und  $550.106 \text{ m}^3/\text{Monat}$  (2013). Bei der nutzbaren Wasserabgabe kann die größte Streuung der Monatswerte in den Jahren 2005 und 2006 festgestellt werden, währenddessen sich die Monatsabgaben in den Jahren 2009 und 2011 eher konzentrieren und weniger streuen. Das Jahr 2015 konnte den höchsten Median- und Maximalwert seit 2006 verzeichnen.

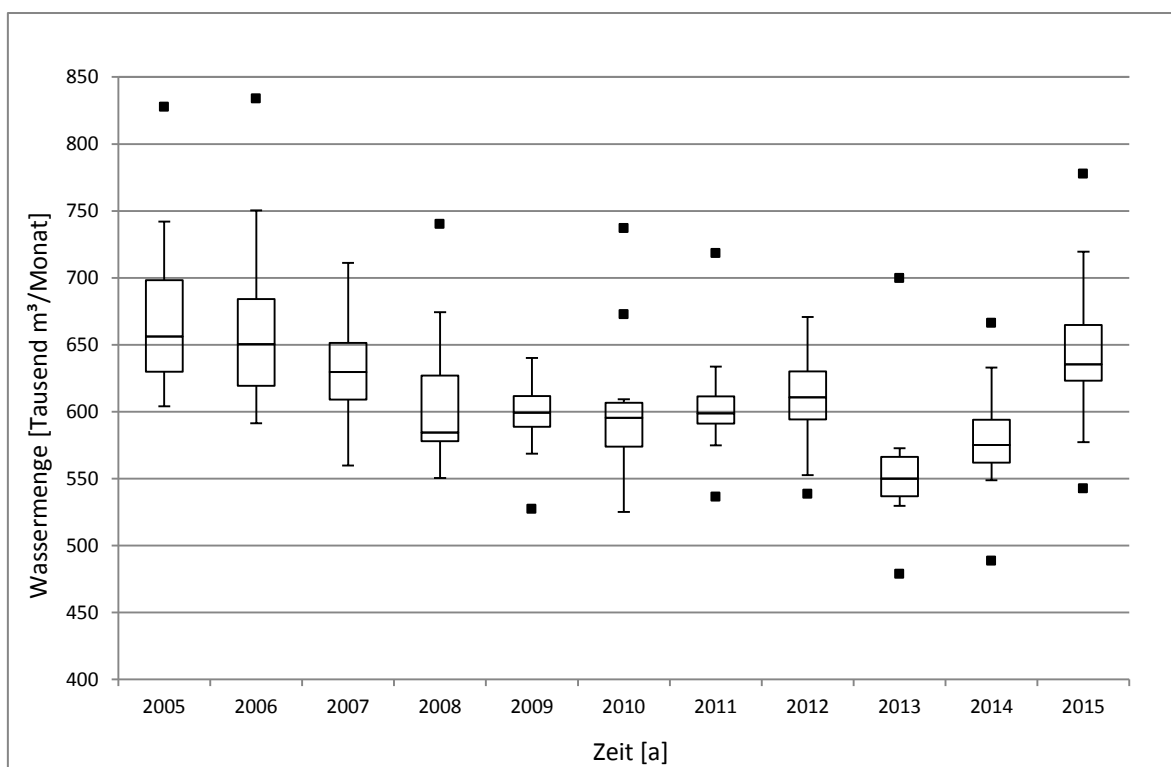


Abbildung 17: Monatliche Wasserabgabe im Versorgungsbereich Sulzfeld (insgesamt, inkl. Kunden und FWM) von 2005-2015 [m³/Monat]

Der Verlauf der Wasserabgaben ist, egal bei welcher Darstellung, stets der gleiche. Die Maximalwerte liegen überwiegend in den Jahren 2005 und 2006, die Minimalwerte hingegen treten im Jahr 2013 auf. Das Jahr 2015 verzeichnet wieder einen Anstieg der Wasserabgabe. Der Verlauf der Wasserabgabe der letzten 11 Jahre zeigt keinen eindeutigen Trend. Die nachfolgende Tabelle 9 fasst nochmal die Ausreißer, die durchschnittlichen Maximal- und Minimalwerte, die Medianwerte und die Mittelwerte der letzten 11 Jahre für den Versorgungsbereich Sulzfeld zusammen.

Die Monatswerte der Netzeinspeisung und der nutzbaren Wasserabgabe weichen zwischen 0,6 % und 1,9 % voneinander ab. Diese Abweichungen können als Wasserwerkseigenverbrauch und Wasserverluste (z. B. Undichtigkeiten) angesehen werden.

Da für die Kunden keine Tagesabnahmedaten verfügbar sind, werden die Abweichungen der Monatswerte vergleichend herangezogen. Um die nutzbare Tagesabgabe an die Abnehmer, also den derzeitigen Tagesbedarf ermitteln zu können, ist der Tageszulauf zum SB WW Sulzfeld um 1,25 % zu reduzieren.

Tabelle 9: Zusammenfassung des Spitzenbedarfs

	<b>Ausreißer Max</b>	<b>Max Mittel</b>	<b>Median absolut</b>	<b>Mittel absolut</b>	<b>Min Mittel</b>	<b>Ausreißer Min</b>
<b>Monatszulauf zu SB WW Sulzfeld [m³/Monat]</b>	841.236	672.910	618.007	625.683	572.397	487.926
<b>Nutzbare Monatsabgabe an Abnehmer [m³/Monat]</b>	833.941	668.786	607.270	616.782	562.063	478.794
<b>Tageszulauf zu SB WW Sulzfeld [m³/d]</b>	32.751	25.592	20.262	20.463	15.191	12.273
<b>Nutzbare Tagesabgabe an Abnehmer [m³/d]</b>	32.342	25.272	20.009	20.207	15.001	12.120

### 3.6 Analyse der bestehenden Wasserqualität

Die deutsche Trinkwasserverordnung gibt auf nationaler Ebene die einzuhaltenden Grenzwerte für mikrobiologische, chemische und Indikator-Parameter vor. Die Einhaltung dieser Grenzwerte ist durch Untersuchungen der WVU sicherzustellen und von den zuständigen Behörden zu überprüfen. (DVGW W 254 (H), 1988, S. 7)

Die DIN 2000 gibt die allgemein anerkannten Regeln der Technik wieder und stellt in den fünf Leitsätzen zur Beschaffenheit des Trinkwassers die qualitativen Anforderungen dar. Diese beinhalten, dass Trinkwasser frei von Krankheitserregern sein sollte und keine gesundheitsschädlichen Eigenschaften aufweisen darf. Weiterhin soll Trinkwasser keimfrei und appetitlich sein, zum Genuss anregen, farblos, kühl, geruchlos und geschmacklich einwandfrei sein. Trinkwasser soll keine Korrosionsschäden hervorrufen und der Gehalt an gelösten Stoffen soll sich in Grenzen halten. (Urban, 2013, S. 2f; DIN 2000, 2000)

Die Rohwasserqualität und –zusammensetzung bestimmt maßgebend die Zusammensetzung des Trinkwassers. Rohwasseruntersuchungen dienen der Erfassung kurz- und langfristiger Veränderungen der Wasserbeschaffenheit. Weiterhin gewährleisten sie eine optimale Einstellung und Steuerung der Wasseraufbereitungsanlage. (DVGW W 254 (H), 1988, S. 7)

In diesem Kapitel wird die Beschaffenheit des Rohwassers aus der WGA Sulzfeld-Marktsteft analysiert. Anschließend wird das derzeitige Trinkwasser (Eigenwasser und Fremdwasser der WFW) untersucht. Weiterhin wird in diesem Abschnitt die Veränderung der Wasserbeschaffenheit durch Mischung der Trinkwässer aus Eigengewinnung und Fremdbezug ermittelt. Der Abschnitt schließt mit einer Betrachtung der Beschaffenheit des Mainwassers und der Belastung des Rohwassers durch anthropogene Spurenstoffe.

Zur Beurteilung der qualitativen Ausgangssituation wurden die Untersuchungsergebnisse der letzten fünf Jahre (2011 bis 2015) verwendet. Lediglich die Befunde der

Netzeinspeisung beginnen erst im Jahr 2015, weil seither ein Mischungsverhältnis von 1:1 gefahren wird. Die Beschaffenheit der einzelnen Roh- und Trinkwasser befindet sich in Anhang 4.

### 3.6.1 Rohwasseranalysen

Das Ergebnis einer Rohwasseruntersuchung gibt Aufschluss über die spätere Trinkwasserqualität. Dabei werden die trinkwasserrelevanten Parameter untersucht, die ggf. auf eine notwendige Trinkwasseraufbereitung hinweisen.

Im Zulauf zum WW Sulzfeld existieren zwei verschiedene Mischrohwater. Dabei werden entweder die Wasser der drei Vertikalfilterbrunnen S2, N1 und N2 oder die Wasser der Horizontalfilterbrunnen Sulzfeld (HS) und Marktsteft (HM) und des Vertikalfilterbrunnens S1 miteinander gemischt. Andere Mischkonstellationen sind ungünstig und werden deshalb nicht vorgenommen. Es liegen Analysen folgender dem WW Sulzfeld zulaufender Rohwasser an den entsprechenden Probenahmestellen zur Beurteilung vor:

- WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S2/N1/N2 vor Oxidator 2
- WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S1/HM/HS vor Oxidator 2.

#### Physikalisch-chemische Parameter

Die Tabelle 10 enthält nur die wichtigsten Parameter der Rohwasseruntersuchung. Weitere Parameter können dem Anhang 4 entnommen werden. Die Analyse der mikrobiologischen Parameter und die Untersuchung der Korrosionschemie erfolgen im Anschluss.

Tabelle 10: Physikalisch-chemische Parameter der Brunnenwasser S1/HM/HS und S2/N1/N2

	Brunnen S1/HM/HS	Brunnen S2/N1/N2	Grenzwert nach TrinkwV 2001
<b>Sensorische Größen (Farbe, Geruch, Geschmack)</b>	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	
<b>Trübung [NTU]</b>	0,1 - 0,18 (0,14)	0,09 - 0,18 (0,14)	1,0
<b>Temperatur [°C]</b>	12,0 - 12,6 (12,27)	11,9 - 12,7 (12,1)	
<b>Leitfähigkeit [<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>]</b>	1.220 - 1.300 (1.271)	1.110 - 1.190 (1.168)	2.790
<b>pH-Wert [-]</b>	7,12 - 7,20 (7,17)	7,11 - 7,18 (7,15)	6,5 und 9,5
<b>Calcitlösekapazität [mg/L]</b>	-15,3 - -7,3 (-11,86)	-17,7 - -4,3 (-13,1)	5
<b>Gesamthärte [mmol/L]</b>	5,62 - 6,04 (5,88)	5,53 - 6,13 (5,96)	
<b>Sauerstoff [mg/L]</b>	0,9 - 1,4 (1,2)	1,3 - 2,1 (1,7)	
<b>Eisen [mg/L]</b>	0,0006 - 0,0062 (0,0014)	0,0005 - 0,0022 (0,0010)	0,2
<b>Mangan [mg/L]</b>	0,0017 - 0,0115 (0,0068)	< 0,0005 - 0,0031 (< 0,0005)	0,05
<b>Nitrat [mg/L]</b>	33,0 - 39,8 (37,2)	32 - 40,7 (37,7)	50
<b>Nitrit [mg/L]</b>	< 0,01 - 0,01 (< 0,01)	< 0,01	0,5
<b>Sulfat [mg/L]</b>	235 - <b>256</b> (246)	220 - <b>257</b> (242)	250
<b>Chlorid [mg/L]</b>	83,9 - 93,7 (89,41)	51,9 - 70,6 (58,4)	250
<b>DOC [mg/L]</b>	0,42 - 0,54 (0,48)	0,36 - 0,57 (0,42)	
<b>SAK-254 [<math>\text{m}^{-1}</math>]</b>	1,0 - 1,2 (1,06)	0,8 - 1,2 (0,9)	



Die Wassertemperatur unterliegt keinen jahreszeitlichen Einflüssen.

Beide Rohwasser sind durch ihre hohe Leitfähigkeit mit durchschnittlich 1.168  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (aus Brunnen S2/N1/N2) und 1.271  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (S1/HM/HS) als hoch mineralisiert einzustufen, eine Grenzwertüberschreitung ist jedoch nicht gegeben.

Die Calcitlösekapazität der Rohwasser der Brunnen S2/N1/N2 und S1/HM/HS zeigt rechnerisch jeweils kalkabscheidende Eigenschaften.

Die Gesamthärte der Rohwasser entspricht jeweils gemäß § 9 Absatz 2 WRMG dem Härtebereich „hart“. (Wasch- und Reinigungsmittelgesetz (WRMG), 2007)

Sauerstoffarme Grundwasser (ca.  $< 1 \text{ mg/L}$ ) können als reduzierte Wasser angesehen werden und müssen vor der Nutzung als Trinkwasser mit Sauerstoff angereichert werden. Nur so kann zweiwertiges Eisen oxidiert und filtriert werden. Weiterhin bewirkt die Sauerstoffanreicherung, dass sich manganbindende Bakterien im nachgeschalteten Filterbett ansiedeln und zweiwertiges Mangan zu Braunstein oxidiert wird. Damit sich in Rohrleitungen eine schützende Deckschicht (Kalk-Rost-Schutzschicht) ausbildet, sollte die Sauerstoffkonzentration von ca. 6 mg/L nicht unterschritten werden. (Fritsch, et al., 2014, S. 285f, 344f) Beide Wasser erreichen nicht die empfohlene Mindestkonzentration von 6 mg/L.

Die maximalen Sulfatkonzentrationen überschreiten sowohl beim Rohwasser der Brunnen S1/HM/HS als auch beim Rohwasser der Brunnen S2/N1/N2 den Grenzwert der TrinkwV 2001 von 250 mg/L. Die durchschnittlichen Konzentrationswerte liegen mit 242 mg/L und 246 mg/L knapp unter dem Grenzwert.

Der DOC (dissolved organic carbon) erfasst den Kohlenstoffanteil, der im Wasser gelöst vorliegenden organischen Stoffe. Der spektrale Absorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK-254) gibt Auskunft über das Maß der Belastung eines Wassers mit gelösten organischen Wasserinhaltsstoffen. Die Messwerte der beiden Rohwasser in Tabelle 10 sind als „normal“ zu bewerten. Damit bleibt festzuhalten, dass für die Rohwasser keine nennenswerten natürlich organischen Belastungen auftreten.

### **Untersuchung nach Anlage 1 (mikrobiologische Parameter) der TrinkwV 2001**

Die TrinkwV 2001 nennt in § 4 Abs. 1 allgemeine Anforderungen an die Beschaffenheit eines Trinkwassers. Darin steht unter anderem, dass die menschliche Gesundheit durch den Genuss und Gebrauch von Trinkwasser nicht geschädigt werden darf und insbesondere Krankheitserreger nicht im Trinkwasser vorhanden sein dürfen. In § 5 TrinkwV 2001 werden die mikrobiologischen Anforderungen konkretisiert und es wird auf die Einhaltung der in Anlage 1 TrinkwV 2001 festgelegten Grenzwerte für mikrobiologische Parameter verwiesen. Weitere einzuhaltende mikrobiologische Parameter

sind in der Liste der Indikatorparameter in Anlage 3 TrinkwV 2001 enthalten. (Trinkwasserverordnung (TrinkwV), 2001, S. 3ff)

Eine Zusammenfassung der mikrobiologischen Untersuchungsergebnisse der Rohwasseranalysen befindet sich in Anhang 5.

#### Rohwasser der Brunnen S2/N1/N2

*Escherichia coli* sind nicht nachweisbar.

Innerhalb von 62 Analysen wurde der Grenzwert (0/100mL) für coliforme Bakterien einmal am 04.08.2015 überschritten mit 1/100mL. Da es ein Rohwasser ist, erfolgt anschließend noch die Desinfektion mit Chlordioxid. Somit wird eine einwandfreie Trinkwasserqualität gesichert.

Die Koloniezahlen bei 22 °C liegen zwischen 0 und 2 KBE/mL. Damit wird sowohl der Grenzwert am Wasserwerksausgang (20 KBE/mL), als auch am Zapfhahn des Verbrauchers (100 KBE/mL) eingehalten.

Die Koloniezahlen bei 36 °C liegen zwischen 0 und 3 KBE/mL. Der Grenzwert der TrinkwV 2001 gibt 100 KBE/mL vor und gilt als eingehalten.

*Clostridium perfringens* sind nicht nachweisbar.

Zu den Parametern Enterokokken und *Pseudomonas aeruginosa* liegen keine Befunde vor.

#### Rohwasser der Brunnen S1/HM/HS

*Escherichia coli* und coliforme Bakterien sind nicht nachweisbar.

Die Koloniezahlen bei 22 °C liegen zwischen 0 und 9 KBE/mL. Damit wird sowohl der Grenzwert am Wasserwerksausgang (20 KBE/mL), als auch am Zapfhahn des Verbrauchers (100 KBE/mL) eingehalten.

Die Koloniezahlen bei 36 °C liegen zwischen 0 und 2 KBE/mL. Der Grenzwert der TrinkwV 2001 gilt als eingehalten.

*Clostridium perfringens* sind nicht nachweisbar.

Zu den Parametern Enterokokken und *Pseudomonas aeruginosa* liegen keine Befunde vor.

## **Korrosionschemische Beurteilung des Rohwassers gemäß DIN EN 12502 und DIN 50930-6**

Durch die Wechselwirkungen zwischen den wasserführenden metallischen Werkstoffen in Wasserverteilungs- und -speichersystemen und dem Wasser, kann es zu Korrosionserscheinungen kommen, die in manchen Fällen sogar zu einer Funktionsstörung des Systems führen. Die Werkstoffart, die Wasserbeschaffenheit, die Ausführung der Installation und die Betriebsbedingungen beeinflussen das Ausmaß der Korrosionserscheinung. Diese komplexen Zusammenhänge bewirken, dass das Ausmaß der Korrosionserscheinung nur als Wahrscheinlichkeitsaussage angegeben werden kann. Die Korrosionswahrscheinlichkeit eines Wassers kann mithilfe der Normen DIN EN 12502 und DIN 50930-6 ermittelt werden.

Die Norm DIN EN 12502 „Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und Wasserspeichersystemen“ besteht aus fünf Teilen:

- Teil 1: Allgemeines
- Teil 2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen
- Teil 3: Einflussfaktoren für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe
- Teil 4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle
- Teil 5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle

Die Normen DIN EN 12502-1 bis 12502-5 ersetzen die Normen DIN 50930-1 bis 50930-5. Die Norm DIN 50930-6 bleibt erhalten und behandelt die Veränderung der Beschaffenheit des Trinkwassers bei Kontakt mit metallischen Werkstoffen. Die Normen DIN EN 12502-2 und 12502-3 beinhalten u. a. die Berechnung der korrosionschemischen Quotienten  $S$ ,  $S_1$  und  $S_2$ , anhand derer die Korrosionswahrscheinlichkeit bestimmt werden kann. Sie werden wie folgt berechnet:

$$S = \frac{c_{HCO_3^-}}{c_{SO_4^{2-}}} \quad (1)$$

$$S_1 = \frac{c_{Cl^-} + c_{NO_3^-} + 2c_{SO_4^{2-}}}{c_{HCO_3^-}} \quad (2)$$

$$S_2 = \frac{c_{Cl^-} + 2c_{SO_4^{2-}}}{c_{NO_3^-}} \quad (3)$$

Die Ergebnisse der korrosionschemischen Berechnungen und Auswertungen der Roh- und Reinwasser befinden sich in Anhang 6.

### Rohwasser der Brunnen S2/N1/N2

Da die Nitratkonzentration den Sollwert von 18,6 mg/L überschreitet, liegt eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für eine selektive Korrosion beim Einsatz von schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen vor.

Die Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmtem Wasser für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe ist dem korrosionschemischen Quotient  $S_1$  nach zu urteilen mit 1,2 bis 1,38 beachtenswert.

Das Rohwasser hat aufgrund der geringen Sauerstoffkonzentration (Anforderung:  $c(\text{O}_2) > 3,2 \text{ mg/L}$ ) von 1,3 bis 2,1 mg/L eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion bei Gusseisen, unlegierten und niedriglegierten Stählen. Alle weiteren Anforderungen der DIN EN 12502 werden erfüllt. Das Wasser weist somit eine geringe Korrosionswahrscheinlichkeit für Kupfer und Kupferlegierungen und nichtrostende Stähle auf.

Die DIN 50930-6 gibt eine Basenkapazität ( $K_{B\ 8,2}$ ) von  $\leq 0,2 \text{ mmol/L}$  und einen korrosionschemischen Quotienten ( $S_1$ ) von  $< 1$  vor, um die Beschaffenheit des Trinkwassers beim Einsatz von schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen beizubehalten. Da das Rohwasser einen  $K_{B\ 8,2}$ -Wert von 0,9 bis 1,07 mmol/L und einen  $S_1$ -Wert von 1,2 bis 1,38 vorweist, sollten schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe nicht verwendet werden. Nur durch eine Enthärtungsanlage könnte die Basenkapazität gesenkt werden.

Durch den geringen Sauerstoffgehalt des Rohwassers kann es auf der Oberfläche von Rohren aus unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen zu keiner Deckschichtbildung kommen, sodass eine Überschreitung des Eisengrenzwertes im Wasser zu befürchten wäre.

### Rohwasser der Brunnen S1/HM/HS

Das Rohwasser der Brunnen S1/HM/HS überschreitet die gleichen Parameter, wie das Rohwasser der Brunnen S2/N1/N2 und ist somit für die gleichen Werkstoffe geeignet bzw. ungeeignet (Vergleich Anhang 6).

### Beurteilung der Betonaggressivität nach DIN 4030

Die DIN 4030 „Beurteilung betonangreifender Wasser, Böden und Gase“ legt unter anderem Kriterien fest, nach denen das Angriffsvermögen eines Wassers auf Beton eingeschätzt werden kann. Die Norm besteht aus zwei Teilen:

- Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte
- Teil 2: Entnahme und Analyse von Wasser- und Bodenproben.

Der Angriffsgrad des Wassers wird nach DIN 4030-1: 2008-06 Tabelle 4 eingeteilt. Dabei ist zwischen den drei Bereichen: schwach, stark und sehr stark zu unterscheiden. Die Bestimmung der Wasser ist in Anhang 7 dargestellt.

#### Rohwasser der Brunnen S2/N1/N2

Die Sulfatkonzentrationen (von 220 bis 257 mg/L) überschreiten den Grenzwert von 200 mg/L. Das Wasser ist somit als schwach betonangreifend einzustufen.

#### Rohwasser der Brunnen S1/HM/HS

Die Sulfatkonzentrationen (von 235 bis 256 mg/L) überschreiten den Grenzwert von 200 mg/L. Das Wasser ist somit als schwach betonangreifend einzustufen.

### **3.6.2 Reinwasseranalysen**

Folgende Reinwasseranalysen liegen zur Beurteilung vor:

- Reinwasser nach Filter 1 bis 6
- Einlauf WFW
- Trinkwasser nach Saugbehälter

Das eingespeiste Trinkwasser nach dem SB ist ein Mischwasser. Dieses wird im Verhältnis 1:1 aus WFW-Wasser und Eigenwasser gemischt. Da das Mischungsverhältnis 1:1 erst seit September 2015 gefahren wird, existieren lediglich vier Laboranalysen.

#### **Physikalisch-chemische Parameter**

Wie schon für die Rohwasser erfolgt auch für die Reinwasser eine Betrachtung der physikalisch-chemischen Parameter. Tabelle 11 stellt dazu die Untersuchungsergebnisse der Wasseranalysen für die wichtigsten ausgewählten physikalisch-chemischen Parameter dar mit den dazugehörigen Grenzwerten der TrinkwV 2001. Die vollständigen Wasseranalysen befinden sich in Anhang 4.

Tabelle 11: Physikalisch-chemische Parameter des Reinwassers nach Filter 1 bis 6, des WFW-Einlaufs und des Trinkwassers nach dem Saugbehälter

	Reinwasser Filter 1 bis 6	Einlauf WFW	Trinkwasser nach Saugbehälter	Grenzwert nach TrinkwV 2001
<b>Sensorische Größen (Farbe, Geruch, Geschmack)</b>	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	
<b>Trübung [NTU]</b>	0,09 - 0,18 (0,14)	0,09 - 0,17 (0,13)	0,17 - 0,21 (0,18)	1,0
<b>Temperatur [°C]</b>	11,9 - 12,8 (12,3)	9,4 - 13,5 (11,4)	12,3 - 13,4 (13,0)	
<b>Leitfähigkeit [µS/cm]</b>	1.110 - 1.300 (1.221)	433 - 527 (483,1)	794 - 848 (826)	2.790
<b>pH-Wert [-]</b>	7,17 - 7,26 (7,22)	7,57 - 7,78 (7,68)	7,34 - 7,39 (7,37)	6,5 und 9,5
<b>Calcitlösekapazität [mg/L]</b>	-25,0 - -14,6 (-18,8)	-13,8 - -4,8 (-11,3)	-13,6 - -9,4 (-11,8)	5
<b>Gesamthärte [mmol/L]</b>	5,51 - 6,10 (5,89)	2,12 - 2,66 (2,40)	3,71 - 3,99 (3,90)	
<b>Sauerstoff [mg/L]</b>	6,9 - 9,3 (8,4)	8,5 - 10,6 (9,5)	8,2 - 9,2 (8,7)	
<b>Eisen [mg/L]</b>	< 0,0005 - 0,0014 (< 0,0005)	< 0,0005 - 0,0031 (0,0012)	< 0,0005 - 0,0021 (0,00053)	0,2
<b>Mangan [mg/L]</b>	< 0,0005 - 0,0015 (< 0,0005)	< 0,0005 - 0,0018 (< 0,0005)	0,0007 - 0,0009 (0,00078)	0,05
<b>Nitrat [mg/L]</b>	31,9 - 41,8 (37)	4,0 - 9,5 (5,97)	18,1 - 18,9 (18,5)	50
<b>Nitrit [mg/L]</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,5
<b>Sulfat [mg/L]</b>	206 - <b>258</b> (242,5)	17,7 - 24,9 (20,8)	118 - 127 (122,3)	250
<b>Chlorid [mg/L]</b>	48,5 - 93,5 (74,8)	10,6 - 16,7 (13,3)	39,0 - 52,1 (44,3)	250
<b>DOC [mg/L]</b>	n.b.	n.b.	n.b.	
<b>SAK-254 [m<sup>-1</sup>]</b>	n.b.	n.b.	n.b.	

Die Temperatur des Reinwassers nach den Filtern 1 bis 6 liegt konstant zwischen 11,9 und 12,8 °C. Das WFW-Wasser hingegen weist einen schwachen jahreszeitlichen Gang der Temperaturen zwischen 9,4 und 13,5 °C auf. Eine repräsentative Aussage zum Verlauf der Wassertemperatur des Trinkwassers nach der Umstellung des Mischungsverhältnisses kann nicht getroffen werden, da die Anzahl der Analysen unzureichend ist.

Die Calcitlösekapazität zeigt rechnerisch für alle drei Wasser kalkabscheidende Eigenschaften.

Die Gesamthärte des Reinwassers nach den Filtern 1 bis 6 ist dem Härtebereich „hart“ zuzuweisen. Das WFW-Wasser hingegen schwankt zwischen einem „mittleren“ und „harten“ Härtegrad. Das Trinkwasser nach dem SB besitzt einen „harten“ Härtegrad.

Die empfohlene Mindestkonzentration an Sauerstoff von 6 mg/L wird von allen drei Trinkwässern überschritten.

Den Grenzwert der Sulfatkonzentration von 250 mg/L überschreitet nur die Maximalkonzentration des Reinwassers nach den Filtern 1 bis 6 mit 258 mg/L. Die durchschnittliche Sulfatkonzentration liegt mit 243 mg/L immer noch sehr hoch, aber unter dem Grenzwert. Das Mischwasser nach dem SB weist durch die geringe Sulfat-

konzentration des WFW Zulaufwassers Konzentrationswerte weit unter dem Grenzwert auf.

Für alle drei Trinkwässer ist keine natürliche organische Belastung nachweisbar.

### **Untersuchung nach Anlage 1 (mikrobiologische Parameter) der TrinkwV 2001**

Wie schon in Abschnitt 3.6.1 werden auch die Reinwasser nach den Vorgaben der TrinkwV 2001 auf mikrobiologische Parameter untersucht.

Eine Zusammenfassung der mikrobiologischen Untersuchungsergebnisse der Wasseranalysen befindet sich in Anhang 5.

#### **WW Sulzfeld, Reinwasser nach Filter 1 bis 6**

Escherichia coli sind nicht nachweisbar.

Innerhalb von 121 Analysen wurde der Grenzwert (0/100 mL) für coliforme Bakterien einmal am 26.01.2011 überschritten mit 1/100 mL. Eine Desinfektion mit Chlordioxid erfolgt noch im Anschluss.

Die Koloniezahlen bei 22 °C liegen zwischen 0 und 2 KBE/mL. Damit wird sowohl der Grenzwert am Wasserwerksausgang (20 KBE/mL), als auch am Zapfhahn des Verbrauchers (100 KBE/mL) eingehalten.

Die Koloniezahlen bei 36 °C liegen zwischen 0 und 4 KBE/mL. Der Grenzwert der TrinkwV 2001 gibt 100 KBE/mL vor und gilt als eingehalten.

Zu den Parametern Enterokokken, Clostridium perfringens und Pseudomonas aeruginosa liegen keine Befunde vor.

#### **WW Sulzfeld, Einlauf WFW**

Escherichia coli und coliforme Bakterien sind nicht nachweisbar.

Die Koloniezahlen bei 22 °C liegen zwischen 0 und 3 KBE/mL. Damit wird sowohl der Grenzwert am Wasserwerksausgang (20 KBE/mL), als auch am Zapfhahn des Verbrauchers (100 KBE/mL) eingehalten.

Die Koloniezahlen bei 36 °C liegen zwischen 0 und 18 KBE/mL. Der Grenzwert der TrinkwV 2001 gibt 100 KBE/mL vor und gilt als eingehalten.

Es liegen zwei Befunde zu Enterokokken vor. Sie konnten nicht nachgewiesen werden.

Zu den Parametern Clostridium perfringens und Pseudomonas aeruginosa liegen keine Befunde vor.

#### WW Sulzfeld nach Saugbehälter

Escherichia coli, Enterokokken, coliforme Bakterien und Clostridium perfringens sind nicht nachweisbar. Die Koloniezahlen bei 22 °C und die Koloniezahlen bei 36 °C liegen ebenfalls bei 0 KBE/mL.

Zu dem Parameter Pseudomonas aeruginosa liegt kein Befund vor.

#### **Korrosionschemische Beurteilung des Rohwassers gemäß DIN EN 12502 und DIN 50930-6 (Vergleich Anhang 6)**

##### WW Sulzfeld Reinwasser nach Filter 1 bis 6

Das Reinwasser nach den Filtern 1 bis 6 im WW Sulzfeld überschreitet mit 31,9 bis 41,8 mg/L den Sollwert der Nitratkonzentration von 18,6 mg/L. Damit liegt eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der selektiven Korrosion beim Einsatz von schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffe vor. Beim gleichen Werkstoff ist die Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmtem Wasser beachtenswert, da der korrosionschemische Quotient  $S_1$  zwischen 1,13 und 1,5 liegt (Sollwert: < 0,5).

Beim Einsatz von Gusseisen, unlegierten und niedriglegierten Stählen, nichtrostenden Stählen, Kupfer und Kupferlegierungen weist das Wasser eine geringe Korrosionswahrscheinlichkeit auf.

Die Anforderungen ( $K_{B\,8,2} \leq 0,2$  und  $S_1 < 1$ ) nach DIN 50930-6 zur Veränderung der Trinkwasserbeschaffenheit beim Einsatz von schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen werden nicht erfüllt. Sowohl der  $K_{B\,8,2}$ -Wert mit 0,75 bis 0,93 mmol/L als auch der korrosionschemische Quotient  $S_1$  mit 1,13 bis 1,5 überschreiten die geforderten Werte. Da sich das Wasser bereits im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindet, wäre eine Verminderung der Basenkapazität nur durch eine Enthärtungsanlage möglich. Im Versorgungsbereich Sulzfeld sollte bei Hausinstallationen von einer Verwendung von schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen abgesehen werden. Weitere Anforderungen nach DIN 50930-6 werden eingehalten.

##### Einlauf WFW

Alle Anforderungen nach DIN 12502 werden eingehalten. Demnach ist die Korrosionswahrscheinlichkeit beim Einsatz von Kuper und Kupferlegierungen, schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen, nichtrostenden Stählen, Gusseisen, unlegierten und niedriglegierten Stählen gering.

Eine Veränderung der Trinkwasserbeschaffenheit ist nur für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe zu besorgen, da sowohl der Maximalwert der Basenkapazität mit 0,33 mmol/L, als auch die durchschnittliche Basenkapazität mit 0,22 mg/L den Sollwert von 0,2 mmol/L übersteigen.



#### WW Sulzfeld nach Saugbehälter

Das eingespeiste Trinkwasser weist eine geringe Korrosionswahrscheinlichkeit beim Einsatz von Kupfer und Kupferlegierungen, nichtrostenden Stählen, Gusseisen, unlegierten und niedriglegierten Stählen auf. Die Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion und der selektiven Korrosion sind bei schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen beachtenswert. Der korrosionschemische Quotient  $S_1$  (Anforderung:  $S_1 < 0,5$ ) liegt zwischen 0,83 und 0,88 und der Maximalwert der Nitratkonzentration (Anforderung:  $< 18,6 \text{ mg/L}$ ) liegt bei 18,9 mg/L.

Eine Veränderung der Trinkwasserbeschaffenheit nach DIN 50930-6 ist nur für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe zu besorgen, da die Basenkapazität mit Werten von 0,44 bis 0,7 mmol/L den Grenzwert von 0,2 mmol/L überschreitet. Von einer Verwendung dieses Werkstoffes in Hausinstallationen innerhalb des Versorgungsbereiches ist deshalb abzusehen. Alle Anforderungen an weitere Werkstoffe innerhalb der DIN 50930-6 werden eingehalten.

#### **Beurteilung der Betonaggressivität nach DIN 4030**

Die Beurteilung der Betonaggressivität erfolgt, wie schon in Abschnitt 3.6.1 erwähnt, nach DIN 4030-1: 2008-06 Tabelle 4. Die Bestimmung der Wasser ist in Anhang 7 dargestellt.

#### WW Sulzfeld, Reinwasser Filter 1 bis 6

Die Sulfatkonzentrationen (von 206 bis 258 mg/L) überschreiten den Grenzwert von 200 mg/L. Das Wasser ist somit als schwach betonangreifend einzustufen.

#### WW Sulzfeld, Einlauf WFW

Das Wasser ist nach DIN 4030-1 als nicht betonangreifend einzustufen.

#### WW Sulzfeld nach Saugbehälter

Das Wasser ist nach DIN 4030-1 als nicht betonangreifend einzustufen.

### **3.6.3 Mainwasser**

Da das Rohwasser der WGA Sulzfeld-Marktsteft ein Mischwasser aus dem Grundwasser und dem Uferfiltrat des Mains ist, wird an dieser Stelle die Beschaffenheit des Oberflächenwassers untersucht. Der Anteil der Wasser unterscheidet sich in Abhängigkeit der Niederschlagsverhältnisse, des Mainwasserstandes und der Fördermenge der Brunnen.

Um die Beschaffenheit des Mainwassers bestimmen zu können, wurden der Bewertung Messdaten von 2006 bis 2014 zu Grunde gelegt (siehe Tabelle 12). Im Gegensatz zu Grundwassern hat die Wassertemperatur des Oberflächenwassers eine jahreszeitliche

Schwankung vorzuweisen. Diese liegt zwischen 1,1 und 23,6 °C. Das Wasser ist sauerstoffgesättigt. Die Trübung des Mainwassers schwankt zwischen 1,2 und 104 NTU. Das Mainwasser ist geringer mineralisiert (die Leitfähigkeit beträgt im Durchschnitt: 682 µS/cm) als das Grundwasser (die Leitfähigkeit beträgt im Durchschnitt zwischen 1.168 und 1.271 µS/cm) und hat eine geringere Gesamthärte von durchschnittlich 3 mmol/L. Die Sulfat- und Nitratkonzentrationen liegen deutlich niedriger als im Grundwasser. Grund hierfür ist der ausbleibende geologische Einfluss des Muschelkalks.

Tabelle 12: Main-Analysedaten von 2006 bis 2014

Main-Analysedaten von 2006 bis 2014				
		Max	Min	Mittel
Temperatur	°C	23,6	1,1	12,5
Sauerstoff	mg/L	14,3	6,6	10,0
pH-Wert		8,4	7,8	8,1
Leitfähigkeit	µS/m	888	389	682
Trübung	NTU	104	1,2	14,8
Gesamthärte	mmol/L	5,0	2,1	3
Magnesium	mg/L	28,3	12	23,0
Calcium	mg/L	96,7	46,8	78,9
Chlorid	mg/L	75	19,9	42,6
Sulfat	mg/L	112	38,8	80,7
Nitrat	mg/L	25,5	12,6	18,8

### 3.6.4 Anthropogene organische Spurenstoffe

Das Grundwasser der WGA Sulzfeld-Marktsteft setzt sich durch die unmittelbare Nähe zum Main zeitweise aus bis zu 50 % Uferfiltrat zusammen. Das Oberflächenwasser wird zwar durch die Bodenpassage filtriert und biologisch gereinigt, ein Durchdringen von Schadstoffen bis in die Trinkwasserbrunnen ist dennoch nicht auszuschließen. Durch Untersuchungen des Rohwassers und des Mainwassers auf organische Spurenstoffe kann nicht nur eine Aussage zum Gesundheitsrisiko, sondern auch zur Schutzwirkung des Untergrundes getroffen werden. National und international sind jedoch keine gesetzlichen Trinkwasser-Grenzwerte festgelegt. § 6 Abs. 1 TrinkwV 2001 gibt vor, dass Wasser für den menschlichen Gebrauch keine chemischen Stoffe in gesundheits-schädlichen Konzentrationen enthalten darf. Eine gesundheitliche Schädigung bei lebenslangem täglichem Verzehr ist auszuschließen, wenn der gesundheitliche Leit- (LW) bzw. Orientierungswert (GOW) eines Stoffes nicht überschritten wird.

Zu den anthropogenen organischen Spurenstoffen gehören unter anderem Rückstände und Metabolite von Arzneimitteln, aus der Industrie oder der Landwirtschaft. Für das Rohwasser des Wassergewinnungsgebietes Sulzfeld-Marktsteft liegen keine Langzeitbefunde vor. Eine Einzeluntersuchung fand am 17.05.2010 statt. Zur Beurteilung der Spurenstoffbelastung wurde der Einzelbefund herangezogen. Ein Großteil der Spurenstoffe liegt dabei unter der Nachweisgrenze, vereinzelt konnten jedoch Positivbefunde ermittelt werden. Die Spurenstoffe werden mit Konzentration und Herkunft in Tabelle 13 aufgeführt. Der gesamte Untersuchungsbefund befindet sich in Anhang 8.

Tabelle 13: Spurenstoffe des Rohwassers mit Konzentration und Herkunft des Stoffes

Spurenstoff	BG		Rohwasser S1/HM/HS	Rohwasser S2/N1/N2	Herkunft
EDTA (Ethyldinitrilotetraacetat)	0,5	µg/L	2,2	1,7	Synthetisch organischer Komplexbildner - Industrie
Chloridazon-Desphenyl	0,02	µg/L	0,2	0,34	Metabolite von Chloridazon - Pflanzenschutzmittel (Herbizid)
Chloridazon-Metabolit-B1	0,02	µg/L	0,04	0,1	Metabolite von Chloridazon - Pflanzenschutzmittel (Herbizid)
N, N-Dimethylsulfamid	0,01	µg/L	1,1	1,3	Metabolit von Dichlofluanid und Tolyfluanid - Fungizide
Carbamazepin	10	ng/L	12	< BG	Antiepileptikum
Amidotrizoesäure	10	ng/L	58	67	Röntgen- kontrastmittel
Iopamidol	10	ng/L	16	11	Röntgen- kontrastmittel

Folgende GOW für Trinkwasser werden vom UBA angegeben (Umweltbundesamt, 2014):

- Carbamazepin: 0,3 µg/L
- Iopamidol: 1,0 µg/L
- Amidotrizoesäure: 1,0 µg/L

Bei Amidotrizoesäure handelt es sich um ein ionisches jodhaltiges Röntgenkontrastmittel, welches sowohl bei der Bodenpassage als auch bei einer Behandlung mit Aktivkohle nicht oder nur in sehr geringem Umfang adsorbierbar ist, aufgrund seiner sehr hohen Polarität. Eine vorherige Ozonung verbessert die Abbaubarkeit, lässt aber nachweislich jodierte organische Transformationsprodukte entstehen. Iopamidol ist ein nichtionisches jodhaltiges Kontrastmittel und lässt sich nur geringfügig besser abbauen als Amidotrizoesäure. Beide Stoffe liegen im Rohwasser unterhalb des GOW für Trinkwasser. Durch einen hohen und steigenden Verbrauch, sowie ihre Stoffeigenschaften bedürfen sie in Zukunft voraussichtlich einer höheren Beachtung. (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), 2010)

Carbamazepin ist ein Arzneimittel, welches vorwiegend zur Behandlung von Epilepsien eingesetzt wird. Es weist eine biologische Abbaubarkeit von unter 10 % auf. Die Adsorbierbarkeit an Aktivkohle kann jedoch als gut bis sehr gut eingeschätzt werden. Im Untergrund wird Carbamazepin bei anaeroben Verhältnissen teilweise abgebaut. Im Rohwasser S2/N1/N2 liegt Carbamazepin unter der Bestimmungsgrenze. Im Rohwasser S1/HM/HS ist es nachweisbar mit Konzentrationswerten, die unterhalb des GOW liegen. (Jekel, 2013, S. 6ff)

Eine Publikation des UBA aus dem Jahr 2012 „Gesundheitliche Orientierungswerte für nicht relevante Metaboliten von Wirkstoffen aus Pflanzenschutzmitteln“ gibt folgende GOW an (Umweltbundesamt, 2012, S. 5ff):

- N, N-Dimethylsulfamid: 1,0 µg/L
- Chloridazon-Metabolit-B1: 3,0 µg/L
- Chloridazon-Desphenyl (Metabolit B): 3,0 µg/L

Die Untersuchungswerte in Tabelle 13 zeigen für N, N-Dimethylsulfamid (DMS) (vom UBA 2008 als toxikologisch und ökotoxikologisch unkritisch eingestuft), ein nicht relevanter Metabolit des Fungizids Tolyfluanid, eine Überschreitung des GOW an. Tolyfluanid wurde überwiegend im Obst-, Wein- und Hopfenanbau eingesetzt. Seit 2007 ruht die Zulassung für alle Freilandanwendungen. Der Einsatz von Ozon in der Trinkwasseraufbereitung kann DMS zu N, Nitroso-Dimethylamin (NDMA) umsetzen. NDMA wirkt wahrscheinlich humankarzinogen. (Umweltbundesamt, 2012, S. 11; Sturm, Kiefer, Kollotzek, & Rogg, 2010, S. 950f)

Chloridazon ist ein Herbizid aus dem Rübenanbau. Im Rohwasser des Wassergewinnungsgebietes Sulzfeld-Marktsteft können die Transformationsprodukte, Metabolit B und B1 gefunden werden. Die Konzentrationswerte liegen unterhalb des GOW. Metabolit B weist eine hohe Entfernungsrates beim Einsatz von Aktivkohle auf. (Haist-Gulde, 2014, S. 10; Jekel, 2013, S. 13)

Bei Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln treten im Rohwasser oft die Transformationsprodukte in höheren Konzentrationen auf als der Wirkstoff selbst. Häufig sind die genauen Eigenschaften der Metaboliten nicht bekannt, was insbesondere in der Trinkwasseraufbereitung eine Aussage zum Verhalten erschwert. (Bergmann, 2011)

EDTA ist ein organischer Komplexbildner aus der Industrie, der durch seine geringfügige bis nicht vorhandene biologische Abbaubarkeit (< 10 %) und Adsorbierbarkeit an Aktivkohle, sowie hohen Einsatzmengen von besonderem Interesse ist.

Der Befund zeigt, dass die Rückstände anthropogen eingebrachter Stoffe ubiquitär in der Umwelt vorhanden sind. Um eine repräsentative Aussage zum Einfluss organischer Spurenstoffe auf das Rohwasser treffen zu können, müsste ein Langzeit-Monitoring des Rohwassers durchgeführt werden.

### **Arzneimittelrückstände**

In den Jahren 2007 bis 2009 führte das LfU gemeinsam mit dem Bayerischen Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) ein risikoorientiertes Untersuchungsprogramm zu Spuren von Arzneimittelwirkstoffen in oberflächenwasserbeeinflussten Wasserversorgungsanlagen in Bayern durch. Es wurden 84 Trinkwasserproben

entnommen und auf insgesamt 29 verschiedene therapeutisch eingesetzte Arzneimittelwirkstoffe untersucht. Die fünf Proben mit den höchsten Rückstandsgehalten wurden in einem Pilotprojekt exemplarisch zusätzlich auf Rückstände von vier gängigen jodhaltigen Röntgenkontrastmitteln untersucht. In 58 der 84 untersuchten Trinkwasserproben konnten keine der untersuchten Arzneimittelrückstände nachgewiesen werden. 21 Proben wiesen allein Rückstände von Carbamazepin auf und in fünf weiteren Proben konnte eine Kombination aus Carbamazepin mit Spuren von Sulfamethoxazol (Antibiotikum) und Primidon (Antiepileptikum) nachgewiesen werden (siehe Abbildung 18 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2009)).

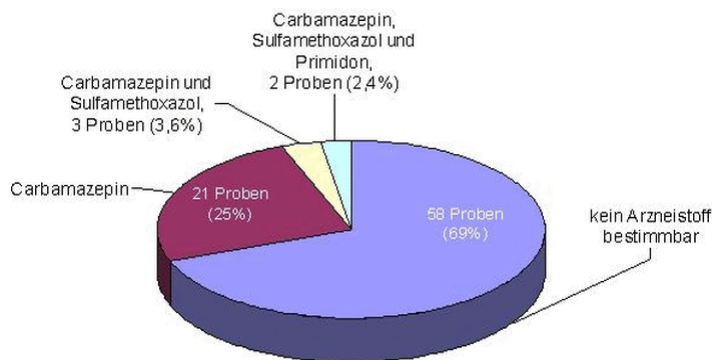


Abbildung 18: Arzneimittelwirkstoffe in 84 untersuchten Proben von oberflächenwasser-beeinflussten Wasserversorgungsanlagen in Bayern

Die ergänzende Untersuchung der fünf am höchsten mit Carbamazepin belasteten Proben ergab vier Proben in denen Amidotrizoesäure in Konzentrationen von 0,16 bis 0,2 µg/L nachgewiesen werden konnte und bei zwei von diesen Proben konnte eine zusätzliche Belastung mit Iopamidol festgestellt werden. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2009)

Die Arzneimittelrückstände wurden vorwiegend in WGA nachgewiesen, deren Brunnen sich nahe Main, Donau und Regnitz befinden. Die überwiegende Menge der in Fließgewässern nachgewiesenen Arzneimittelrückstände werden durch den Untergrund zurückgehalten. Die Untersuchungsergebnisse sind dem Anhang 9 beigelegt. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2009)

Nach einer humantoxikologischen Bewertung durch das LGL kann zusammenfassend gesagt werden, dass eine gesundheitsschädigende Wirkung der untersuchten Stoffe auf die menschliche Gesundheit ausgeschlossen werden kann. Das LGL empfiehlt für Trinkwasserversorgungsunternehmen in Bayern, dass etwaige Untersuchungen durch Wasserversorgungsunternehmen nicht erforderlich sind. (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2009)

## Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe und Biozidprodukt-Wirkstoffen

Die TrinkwV 2001 gibt in Anlage 2 „Chemische Parameter“ Teil I einen Grenzwert für die einzelnen Pflanzenschutzmittel (PSM)-Wirkstoffe und Biozidprodukt (BP)-Wirkstoffe von 0,1 µg/L und für die Summe der Wirkstoffe einen Grenzwert von 0,5 µg/L vor. Die Rohwasser der Einzelbrunnen der WGA Sulzfeld-Marktsteft werden einmal jährlich auf PSM und BP untersucht. Für die Vertikalfilterbrunnen S2, N1 und N2 liegen erst seit 2006 Befunde vor, für die Brunnen HM, HS und S1 sind hingegen Untersuchungsergebnisse seit 1994 vorhanden. Das Wasser des Mains bei Sulzfeld wurde zwischen 1990 und 2015 zwischen ein- und achtmal jährlich untersucht. Für das WFW-Wasser liegen erst seit 2013 digitale Befunde der PSM- und BP-Untersuchung vor, diese erfolgten zweimal jährlich jeweils am „Wasserturm Häckerwald Ablauf Schellert“ und am „Hochbehälter Brandhof, Saugleitung Hochdruckpumpe zum Wasserturm Häckerwald“.

Die digital vorliegenden Befunde enthalten nur eine Auswahl an PSM und BP, weitere untersuchte Stoffe liegen in Papierform vor, wurden in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet. Die Untersuchungsergebnisse enthalten die von der Eigenüberwachungsverordnung Bayern vorgegebenen Pflanzenschutzmittel: Atrazin, Desethylatrazin, Desisopropylatrazin, Simazin, Terbutylazin, Desethylterbutylazin, Bentazon, Dichlorprop, Diuron, Isoproturon und Metazachlor. Diese Liste wurde um weitere Stoffe von der Laborleiterin Frau Dr. Konrad erweitert.

Die nachfolgenden Konzentrationswerte können dem Anhang 10 entnommen werden. Für die Wasser der Vertikalfilterbrunnen S2, N1 und N2 liegen alle PSM und BP unter der Nachweisgrenze. Die Horizontalfilterbrunnen HM und HS sowie der Vertikalfilterbrunnen S1 zeigen für die Wirkstoffe Atrazin und Desethylatrazin Positivbefunde, die allerdings unterhalb des Grenzwertes von 0,1 µg/L liegen. Die Positivbefunde konzentrieren sich auf die Jahre vor 2000. In den Jahren 2001, 2002 (nur HS) und 2006 (nur HM) konnten die Stoffe nochmals in den Horizontalfilterbrunnen nachgewiesen werden. Atrazin ist ein Herbizid, das seinen Einsatz überwiegend beim Maisanbau fand. 1991 wurde es zum Schutz des Grundwassers verboten. Auch 15 Jahre nach dem Verbot konnten Atrazin und sein Abbauprodukt Desethylatrazin im Grundwasser nachgewiesen werden.

Im Wasser des Mains konnten für Atrazin (0,18 µg/L (23.05.1991); 0,14 µg/L (21.07.1992); 0,12 µg/L (22.10.1997)), Desethylatrazin (0,18 µg/L (24.01.2001); 0,16 µg/L (30.05.2001); 0,16 µg/L (22.08.2001)), Desisopropylatrazin (0,1 µg/L (18.4.2001)), Bentazon (0,12 µg/L (23.05.2013)) und Isoproturon (0,31 µg/L (18.04.2001); 0,32 µg/L (21.11.2007); 0,17 µg/L (27.10.2014)) Grenzwertüberschreitungen festgestellt werden. Der Verlauf der gemessenen Konzentrationswerte kann dem Anhang 11 entnommen werden.

Die Befunde der Brunnenrohwasser zeigen, dass der Boden über eine ausreichende Schutzwirkung verfügt, sodass die PSM- und BP-Konzentrationen der Brunnenrohwasser unterhalb der Grenzwerte der TrinkwV 2001 liegen.

### **3.6.5 Entwicklungstrend einzelner Parameter**

Die Diagramme im Anhang 12 stellen das Reinwasser nach den Filtern 1 bis 6 und die Rohwasser S1/HM/HS und S2/N1/N2 in Abhängigkeit ihrer Nitrat-, Chlorid- und Sulfatkonzentration, Leitfähigkeit und Trübung dar.

Alle drei Wasser zeigen über die letzten fünf Jahre für Nitrat und Sulfat einen ähnlich sinkenden Verlauf. Die Nitratwerte weisen von 2001 bis 2015 einen Abfall zwischen 5 und 8 mg/L auf. Die Sulfatwerte zeigen sogar eine Verminderung zwischen 17 und 36 mg/L. Die FWF handelt seit vielen Jahren, getreu dem Motto: „Vorbeugen ist besser als heilen“, im Sinne des Grundwasserschutzes. Neben der Ausweisung von Wasserschutzgebieten werden mit Grundstücksbewirtschaftern innerhalb der Wasserschutzgebiete freiwillige Kooperationsvereinbarungen getroffen, die eine Ausgleichs- und Entschädigungszahlung für eine grundwasserschonende Bewirtschaftung beinhalten. Weiterhin informiert die FWF über das Informationsblatt „Die Quecke“ Landwirte über wichtige Handlungsweisen, Arbeitsverfahren, grundwasserverträgliche Landbewirtschaftungen und Hintergrundinformationen. Erfolgreiche Projekte, wie das „Grundwasserschutz-Brot“ und „Mehrjähriger Energiepflanzenanbau“ tragen zum weiteren Erfolg der sinkenden Nitratkonzentrationen im Grundwasser bei. (Fernwasserversorgung Franken, 2016a)

Die Chloridkonzentrationen der Rohwasser sind gleichbleibend. Es ist kein Trend zu erkennen. Das Wasser der Brunnen S1/HM/HS (durchschnittlich 89 mg/L) weist jedoch höhere Konzentrationen auf als das Wasser der Brunnen S2/N1/N2 (durchschnittlich 58 mg/L). An den Konzentrationswerten des Reinwassers ist zu erkennen, welches Rohwasser gefördert und aufbereitet wurde.

Aufgrund der verschiedenen Chloridkonzentrationen zeigen die Rohwasser auch unterschiedliche Leitfähigkeiten. Im Allgemeinen ist ein sinkender Verlauf zu erkennen. Die Leitfähigkeit sank zwischen 90 und 140  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Die Trübungswerte der drei Wasser sind ähnlich und seit 2013 leicht ansteigend. Bei einer Betrachtung des gesamten Zeitraumes (2011 bis 2015) kann jedoch kein Trend erkannt werden.

### **3.6.6 Qualitative Bedeutung des Fremdwasserbezugs**

Im Anhang 13 sind in einer Tabelle die Ergebnisse der Beurteilung der Wasseranalysen zusammengefasst. Die Gegenüberstellung von Trink- und Rohwasser in der Tabelle zeigt deutlich, dass ohne die Mischung des aufbereiteten Eigenwassers mit dem Fremdwasser der WFW sehr hohe Nitratkonzentrationen im Wasser vorliegen würden. Die

Nitratkonzentrationen im Rohwasser und aufbereiteten Eigenwasser deuten auf den anthropogenen Einfluss durch landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet der Brunnen hin. Weitere Gründe, die eine Mischung des aufbereiteten Eigenwassers erfordern, sind die hohen Sulfatkonzentrationen des Eigenwassers. In der Vergangenheit lagen diese sogar über dem Grenzwert der TrinkwV 2001. Sulfatkonzentrationen von über 250 mg/L führen zu Magen- und Darmstörungen und wirken betonaggressiv. In anthropogen nicht belasteten Grundwassern sind Sulfatkonzentrationen von 10 bis 30 mg/L als „normal“ zu bewerten. Im Muschelkalk und Gipskeuper sind Konzentrationswerte bis zu 150 mg/L üblich, aufgrund einer höheren geologischen Verfügbarkeit. Durch die aufsteigenden Grundwasser aus dem Muschelkalk lassen sich am Standort Sulzfeld die hohen Sulfatkonzentrationswerte begründen. Infolge eines Nitratreintrages kann es zur Oxidation von Eisensulfid (Pyrit) kommen, was einen weiteren Anstieg der Sulfatkonzentration zur Folge hat. (Fritsch, et al., 2014, S. 269f)

Die Untersuchungen der organischen Spurenstoffe im Mainwasser und Rohwasser haben gezeigt, dass das Oberflächenwasser einer viel stärkeren Belastung ausgesetzt ist, als die Grundwasser. Auch wenn keine Grenzwertüberschreitungen nach TrinkwV 2001 der Parameter PSM und BP vorliegen, so überschreitet das Rohwasser den GOW von DMS. Weitere anthropogene organische Spurenstoffe, wie Arzneimittelrückstände können z. T. nachgewiesen werden, die Konzentrationswerte liegen jedoch unterhalb der GOW bzw. LW.

Die Wasserhärte wäre ein Parameter, der bei sinkendem Fremdwasseranteil deutlich ansteigen würde. Derzeit kann die Härte des Rohwassers durch den Fremdwasserbezug um ca. ein Drittel verringert werden.



## 4 Prognose 2040

Wasseraufbereitungsanlagen, wie das WW Sulzfeld, besitzen eine hohe Lebensdauer. Daher ist die Betrachtung und Ermittlung zukünftiger Entwicklungen von großer Bedeutung, um eventuelle Erweiterungen oder Änderungen der Anlage gezielt planen zu können.

Versorgungsgebiete unterliegen demografischen, klimatischen und strukturellen Änderungen, die den bestehenden Wasserbedarf zukünftig ändern können. Die Erstellung einer Wasserbedarfsprognose soll diese Veränderung abschätzen, damit eventuell notwendige Investitionen veranlasst werden, um eine qualitativ und quantitativ einwandfreie Versorgung in der Zukunft zu gewährleisten.

### 4.1 Prognose des Jahreswasserbedarfs bis 2040

Die Wasserbedarfsprognose für den Versorgungsbereich Sulzfeld wurde auf Grundlage einer Kundenbefragung aus dem Jahr 2015 erstellt. Im B-Teil des Fragebogens wurden die Kunden der FWF zur Entwicklung des Wasserbedarfs bis zum Jahr 2040 im jeweiligen Versorgungsgebiet befragt. Die Fragen lauteten wie folgt:

- Welche Erwartungen haben Sie hinsichtlich der Einwohnerentwicklung bis 2040 in Ihrem Gemeindegebiet?
- Welche Erwartungen haben Sie hinsichtlich des Wasserabsatzes bis 2040 in Ihrem Versorgungsgebiet?

Zwischen folgenden Antwortmöglichkeiten konnten sich die Kunden entscheiden:

- a) Anstieg > 10 %
- b) Anstieg < 10 %
- c) Stabil
- d) Abnahme < 10 %
- e) Abnahme > 10 %

Grundsätzlich bestanden nach der Auswertung des Fragebogens zwei Möglichkeiten den zukünftigen Wasserbedarf für den Versorgungsbereich zu ermitteln. Zu unterscheiden war zwischen folgenden Berechnungsmethoden:

1. Berechnung des zukünftigen Wasserbedarfs über die Einwohnerentwicklung bis zum Jahr 2040 und den zugehörigen einwohnerbezogenen Wasserbedarf ( $Q_{dm} = q_{dm} \cdot E$ ) oder
2. Berechnung der prozentualen Veränderung des Wasserbedarfs bis zum Jahr 2040 basierend auf den Befragungsergebnissen und dem Wasserbedarf im Jahr 2015 bzw. dem durchschnittlichen Wasserbedarf von 2011 bis 2015.

Bei dem Versuch den Wasserbedarf bis zum Jahr 2040 mithilfe der Berechnungsmethode 1 zu ermitteln, konnte zunächst für viele Gemeinden die aktuelle Einwohnerzahl bestimmt werden. Ein Teil der FWF-Kunden wird jedoch nur teilversorgt, was eine Ermittlung der tatsächlich versorgten Einwohner erschwert. Ähnlich kompliziert ist die Ermittlung der versorgten Einwohner für Gemeinden, deren Abnahmestellen nur zum Teil im Versorgungsbereich Sulzfeld liegen. Die Einwohnerzahlen für besondere Verbrauchergruppen im Versorgungsbereich Sulzfeld wie Krankenhäuser, Raststätten, Schulen oder Gewerbeparks konnten ebenfalls nicht erhoben werden. Zusätzlich existieren für den Sonderabnehmer FWM keine Einwohnerwerte. Aufgrund der unzureichenden Menge und Qualität der Daten wurde die Prognosemethode 1 letztlich verworfen.

Um den Wasserbedarf bis zum Jahr 2040 mithilfe der prozentualen Veränderung aus der Befragung berechnen zu können, mussten die durchschnittlichen Jahresverbräuche der Kunden an den Abnahmestellen im Versorgungsbereich Sulzfeld von 2011 bis 2015 ( $Q_a$ ) erhoben werden. Diese stammen aus den Abrechnungsdaten der Finanzverwaltung der FWF.

Eine Berechnung basierend auf den Jahresverbräuchen vom Jahr 2015 wurde ebenfalls durchgeführt. Wie bereits aus Abschnitt 3.5.1 hervorgeht, war im Jahr 2015 gegenüber den Vorjahren ein deutlich höherer Wasserabsatz zu verzeichnen. Demnach führte das Berechnungsergebnis zu überhöhten Wasserbedarfswerten und musste verworfen werden.

Anschließend wurde der zukünftige Wasserbedarf für die Abnehmer, wie in Tabelle 14 dargestellt, berechnet. Für Kunden, die nicht an der Befragung teilgenommen haben, wurde ein gleichbleibender Wasserabsatzes bis zum Jahr 2040 angenommen. Für die FWM, als größten Abnehmer im Versorgungsbereich Sulzfeld, wurde vom technischen Betriebsleiter Herrn Rautenberg ausgehend von aktuellen Zahlen und Entwicklungen eine gleichbleibende Wasserabnahme prognostiziert, obwohl diese innerhalb der Kundenbefragung eine Abnahme von  $< 10\%$  angegeben hatte. Die Wasserbedarfsprognose für den Versorgungsbereich Sulzfeld stützt sich hierbei auf die Aussage von Herrn Rautenberg. (Löhner, 2016a)

Tabelle 14: Berechnung des zukünftigen Wasserbedarfs in Abhängigkeit der Antwort aus dem Fragebogen der FWF-Kundenumfrage 2015

	Anstieg $> 10\%$	Anstieg $0\% < x < 10\%$	Stabil	Abnahme $0\% < x < 10\%$	Abnahme $> 10\%$
<b>Mittlerer Wasserabsatz 2040</b>	$= (Q_a \cdot 0,1) + Q_a$	$= (Q_a \cdot 0,05) + Q_a$	$= Q_a$	$= Q_a - (Q_a \cdot 0,05)$	$= Q_a - (Q_a \cdot 0,1)$
<b>Maximaler Wasserabsatz 2040</b>	$= (Q_a \cdot 0,1) + Q_a$	$= (Q_a \cdot 0,0999) + Q_a$	$= Q_a$	$= Q_a - (Q_a \cdot 0,0001)$	$= Q_a - (Q_a \cdot 0,1)$
<b>Minimaler Wasserabsatz 2040</b>	$= (Q_a \cdot 0,1) + Q_a$	$= (Q_a \cdot 0,0001) + Q_a$	$= Q_a$	$= Q_a - (Q_a \cdot 0,0999)$	$= Q_a - (Q_a \cdot 0,1)$

Im Anschluss wurden die Summen des jährlich mittleren, maximalen und minimalen Wasserbedarfs gebildet und die prozentuale Veränderung gegenüber dem durchschnittlichen Jahreswasserbedarf 2011 bis 2015 berechnet.

In einer weiterführenden Berechnung wurden für die Wasserbedarfsprognose bis zum Jahr 2040 folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Neuanschlüsse
- Vollversorgung bislang teilversorgter Orte

Der Versorgungsbereich Sulzfeld schließt einige Gemeinden ein, die bisher keinen Anschluss an das Netz der FWF haben. Zu potentiellen Neuanschlüssen zählen die Gemeinden Albertshofen, Markt Baudenbach, die Gemeinde Buchbrunn, Markt Frickenhausen am Main und Mainstockheim. Die Gemeinden Albertshofen, Buchbrunn und Mainstockheim werden zentral von der Stadt Kitzingen versorgt und verfügen über ausreichende Wasservorkommen entlang des Mains. Daher ist eine Berücksichtigung dieser als zukünftige Kunden nicht notwendig. In den übrigen Gemeinden ist durch die wachsenden Anforderungen an das Trinkwasser mit einem Anschluss an den Versorgungsbereich Sulzfeld zu rechnen, da sie voraussichtlich durch eine Eigenwassergewinnung diesen Ansprüchen nicht gerecht werden können. Derzeit liegen keine aktuellen Wasserverbrauchszahlen vor, sodass der jährliche Wasserbedarf ( $Q_a$ ) aus den Zahlen der versorgten Einwohner ( $E$ ) und dem einwohnerspezifischen Wasserbedarf ( $q_{dm}$ ) berechnet werden muss.

$$Q_a \left[ \frac{m^3}{a} \right] = q_{dm} \left[ \frac{L}{E \cdot d} \right] \cdot E [E] \cdot 365 \left[ \frac{d}{a} \right] \cdot 0,001 \left[ \frac{m^3}{L} \right] \quad (4)$$

Da der einwohnerspezifische Wasserbedarf für die Gemeinden Markt Baudenbach und Markt Frickenhausen am Main nicht bekannt ist, wurde eine Anfrage beim Bayerischen Landesamt für Statistik (LfStat) gestellt. Dieses übermittelte zur weiteren Berechnung die notwendigen Daten aus dem Jahr 2013 für die Gemeinden Markt Baudenbach ( $q_{dm} = 141,2 \text{ L/E} \cdot \text{d}$ ) und Markt Frickenhausen am Main ( $q_{dm} = 133,8 \text{ L/E} \cdot \text{d}$ ). Weiterhin wurden die aktuellen Einwohnerzahlen der Gemeinden aus der GENESIS-Online Datenbank des LfStat erhoben (Bayerisches Landesamt für Statistik (LfStat), 2016). Somit ergibt sich eine zusätzliche Wassermenge von insgesamt  $120.648 \text{ m}^3/\text{a}$ . Der Wasserbedarf wird bis zum Jahr 2040 als konstant angenommen.

Für die bislang teilversorgten Gemeinden Markt Geiselwind, Gaukönigshofen, Stadt Eibelstadt, Markt Winterhausen und Markt Großlangheim ist bis zum Jahr 2040 mit einer Vollversorgung seitens der FWF zu rechnen. Für die Gemeinde Markt Großlangheim wurde bereits ein Vertrag abgeschlossen, der eine Vollversorgung ab 01.04.2016 vorsieht. Da die Gemeinde auch schon in der Befragung einen gleichbleibenden Wasserabsatz angegeben hatte, wurde für das Jahr 2040 die Jahresbestellmenge des neuen Wasserlieferungsvertrages von  $106.500 \text{ m}^3/\text{a}$  angenommen.

Für die restlichen Orte konnte durch das LfStat die Zahl der angeschlossenen Einwohner und deren Pro-Kopf-Verbrauch im Jahr 2013 ermittelt werden. Über die Wasserabgabe der FWF an diese Orte und den Pro-Kopf-Verbrauch konnte die Zahl der aktuell durch die FWF versorgten Einwohner berechnet werden (siehe Formel 4 umgestellt nach Einwohnern ( $E$ )). Die Differenz zwischen angeschlossenen Einwohnern und durch die FWF versorgten Einwohnern ergab die bis zum Jahr 2040 hinzukommenden Einwohner für die FWF. Mittels Formel 4 konnte die zugehörige jährliche Wassermenge errechnet werden. Insgesamt ist durch die Vollversorgung der bislang teilversorgten Orte mit einer zusätzlichen Wasserabgabe von 214.771 m<sup>3</sup>/a zu rechnen.

In Tabelle 15 sind den Berechnungsmethoden/Basisdaten die jeweiligen Berechnungsergebnisse gegenübergestellt. Weiterhin zeigt die Tabelle die prozentuale Veränderung der Jahreswasserabgabe zwischen dem Ausgangszustand und dem Jahr 2040.

Tabelle 15: Berechnungsergebnisse der Jahreswasserabgabe bis zum Jahr 2040

<b><u>Basisdaten</u></b>	<b>Ausgangsjahres- wasserabgabe an Kunden</b>	<b>Minimum 2040</b>	<b>Mittelwert 2040</b>	<b>Maximum 2040</b>
<b>Aktuelle Einwohnerzahlen und Kundenumfrage 2015 zu Einwohnerentwicklung</b>	-	-	-	-
<b>Jahreswasserabgabe von 2015 und Kundenumfrage 2015 [m<sup>3</sup>/a]</b>	<b>7.740.278</b>	<b>7.776.413</b>	<b>7.877.519</b>	<b>7.978.626</b>
<b>prozentuale Veränderung [%]</b>		0,47	1,77	3,08
<b>Jahreswasserabgabe von 2015 und Kundenumfrage 2015 und Neuanschlüsse [m<sup>3</sup>/a]</b>	<b>7.740.278</b>	<b>8.111.833</b>	<b>8.212.939</b>	<b>8.314.046</b>
<b>prozentuale Veränderung [%]</b>		4,80	6,11	7,41
<b>durchschnittliche Jahreswasserabgabe von 2011 bis 2015 und Kundenumfrage 2015 [m<sup>3</sup>/a]</b>	<b>7.196.509</b>	<b>7.228.283</b>	<b>7.321.688</b>	<b>7.415.092</b>
<b>prozentuale Veränderung [%]</b>		0,44	1,74	3,04
<b>durchschnittliche Jahreswasserabgabe von 2011 bis 2015, Kundenumfrage 2015 und Neuanschlüsse [m<sup>3</sup>/a]</b>	<b>7.196.509</b>	<b>7.563.703</b>	<b>7.657.107</b>	<b>7.750.512</b>
<b>prozentuale Veränderung [%]</b>		5,10	6,40	7,70

In der letzten FWF Studie wurde bis zum Jahr 2020 ein minimaler Wasserbedarf von 8.450.000 m<sup>3</sup>/a und ein maximaler Wasserbedarf von 9.820.000 m<sup>3</sup>/a prognostiziert. Sowohl Maximal- als auch Minimalwert liegen deutlich über der prognostizierten maximalen Jahreswasserabgabe bis zum Jahr 2040. Weiterhin zeigt die Tabelle die stark schwankenden Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit der Ausgangsdatenlage. Eine Berechnung auf Basis der Jahreswasserabgabe 2015 würde zu überhöhten Bedarfs- werten führen.

Eine Berechnung auf Basis der Einwohnerwerte konnte nicht durchgeführt werden, aufgrund einer unzureichenden Datenlage.

Die Berechnungsergebnisse der Prognose ohne Neuanschlüsse (prozentuale Änderung von minimal 0,4 % bis maximal 3 %) stimmen annähernd mit der Prognose der Bevölkerungsentwicklung in den kreisfreien Städten und Landkreisen Bayerns von 2014 bis 2034 des LfStat überein, dass in der Region des Versorgungsbereiches Sulzfeld von einer Änderung der Bevölkerungszahlen um minimal -2,5 % und maximal +2,5 % ausgeht. (Bayerisches Landesamt für Statistik (LfStat), 2015) Die hinzukommenden Neuanschlüsse und Vollversorgungen von bislang teilversorgten Orten lassen den Wasserbedarf prozentual ansteigen.

Alle weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit beziehen sich auf die Berechnungsergebnisse der Wasserbedarfsprognose, die auf den durchschnittlichen Jahreswasserabgaben von 2011 bis 2015, der Kundenumfrage aus dem Jahr 2015 und der Annahme der hinzukommenden Neuanschlüsse bzw. Vollversorgungen bislang teilversorgter Orte basiert. Eine Grafik der Wasserbedarfsprognose bis zum Jahr 2040 ist in Anhang 14 dargestellt.

## 4.2 Prognose des Tagesspitzenbedarfs bis 2040

Zur Bemessung von Wasseraufbereitungs-, Wassergewinnungs- und Speichereinrichtungen ist die täglich größte Wasserabgabe [m³/d] maßgebend. Sie ist abhängig von der Größe und Struktur des Versorgungsgebietes, den Tagestemperaturen, der Dauer von Trockenperioden, dem Zeitraum (z. B. Schulferien oder Wochentag) oder anderen Ereignissen. (Fritsch, et al., 2014, S. 23 f)

Der Spitzenwasserbedarf ( $Q_{dmax}$ ) lässt sich aus der mittleren Tagesabgabe ( $Q_{dm}$ ) und dem Tagesspitzenfaktor ( $f_d$ ) berechnen. (DVGW W 410 (A), 2008, S. 15)

$$Q_{dmax} = f_d \cdot Q_{dm} \quad (5)$$

Der Tagesspitzenfaktor ist in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl ( $E$ ) nach DVGW Arbeitsblatt W 410 zu ermitteln. (DVGW W 410 (A), 2008, S. 15)

$$f_d = 3,9 \cdot E^{-0,0752} \quad (6)$$

Eine Berechnung mittels DVGW Arbeitsblatt W 410 wurde durchgeführt und ergab einen Spitzenfaktor von über 2,0. Eine Berechnung auf Grundlage dieses Spitzenfaktors würde zu einer Überdimensionierung des Tagesspitzenwasserbedarfs und später der Wasseraufbereitungsanlage führen. Der DVGW hat das zuständige Gremium bereits mit der Bildung eines Forschungskreises beauftragt, der nun die Wasserbedarfszahlen und -kennwerte untersuchen soll, um die Berechnungsformel zur Ermittlung des Tagesspitzenfaktors über die Einwohnerzahl zu aktualisieren.

Erfahrungswerte der FWF zeigen, dass sich der Tagesspitzenfaktor seit der „Studie 2020“ nicht wesentlich verändert hat. In Absprache mit der technischen Betriebsleitung der FWF wurde der Tagesspitzenfaktor der Gemeinden mit Abnahmestellen im Versorgungs-

bereich Sulzfeld nach dem Vorbild der „Studie 2020“ festgelegt. Dieser einwohnerspezifische Faktor berücksichtigt die Verstärkung der Bedarfsspitze bei geringerer Einwohnerzahl.

- Bis 400 Einwohner -  $f_d$ : 1,8
- Bis 1000 Einwohner -  $f_d$ : 1,6
- > 1000 Einwohner -  $f_d$ : 1,3

Für die einzelnen Abnahmestellen im Versorgungsbereich Sulzfeld wurden aus der Access-Datenbank der „Studie 2020“ die einwohnerspezifischen Spitzenfaktoren übernommen. Die Berechnung des Tagesspitzenfaktors der Gemeinden erfolgte gewichtet nach den einzelnen Tagesspitzenfaktoren der Abgabestellen in Abhängigkeit ihrer jährlichen Wasserabnahme. Eine Gewichtung nach Einwohnern war nicht möglich, da die Einwohnerzahl nicht für jede Abnahmestelle bekannt ist. Den Neuanschlüssen wurde gemäß der Einwohnerzahl ein Tagesspitzenfaktor zugeordnet. (INSUMMA Projektgesellschaft mbH, 2000, S. 22; Rautenberg, 2016b)

Die Berechnung des mittleren Tagesbedarfs erfolgt über den prognostizierten Jahreswasserverbrauch ( $Q_a$ ). (DVGW W 410 (A), 2008, S. 10)

$$Q_{dm} = \frac{Q_a \left[ \frac{m^3}{a} \right]}{365 \left[ \frac{d}{a} \right]} \quad (7)$$

Der berechnete mittlere Tageswasserbedarf und der einwohnerspezifische Tagesspitzenfaktor bilden die Basis für die Berechnung des Tagesspitzenbedarfs im Versorgungsbereich Sulzfeld (Vergleich Formel 5).

Zusätzlich wurde für jeden Kunden der minimale Wasserbedarf nach den Vorgaben der Wasserlieferungsverträge berechnet. Demnach sind die Kunden verpflichtet mindestens 35 % der vereinbarten Tagesmenge zu beziehen:

$$Q_{dmin} = 0,35 \cdot Q_{dm} \quad (8)$$

Der laufende Wasserlieferungsvertrag der FWM endet zum 31.12.2016. Ein derzeitiges ergänzendes Angebot der FWF an die FWM sieht eine Tageshöchstmenge von 7.000 m<sup>3</sup>/d vor. Dieser Wert wird als Spitzenwasserbedarf festgelegt. Über den prognostizierten Jahreswasserbedarf bis zum Jahr 2040 kann der mittlere Tagesbedarf berechnet werden, der mit 5.100 m<sup>3</sup>/d annähernd der derzeitig diskutierten Tagesbestellmenge von 5.000 m<sup>3</sup>/d entspricht. Nach Umstellung der Formel 5 kann mithilfe des Tagesspitzenbedarfs und dem mittleren Tagesbedarf der Tagesspitzenfaktor berechnet werden. Der minimale tägliche Wasserbedarf wird mit der Mindestbezugsmenge von 65 % der Tagesbestellmenge laut vorläufigen Bedingungen des neuen Wasserlieferungsvertrages festgelegt. (Löhner, 2016, S. 2)

Die Berechnung erbrachte folgendes Ergebnis für den Versorgungsbereich Sulzfeld:

Tabelle 16: Berechnungsergebnisse der Tageswasserabgabe bis zum Jahr 2040

<b>Mittlerer Tagesbedarf, <math>Q_{dm}</math> [m³/d]</b>	<b>Maximaler Tagesbedarf, <math>Q_{dmax}</math> [m³/d]</b>	<b>Minimaler Tagesbedarf, <math>Q_{dmin}</math> [m³/d]</b>	<b>Tagesspitzen- verbrauchs faktor [-]</b>
20.978	31.154	8.872	1,49

Die Entwicklung der letzten Jahre zeigt momentan keine Veranlassung den Wasserbedarf aufgrund von Klimaauswirkungen zu beaufschlagen. Die angegebenen Maximal- und Minimalwerte spiegeln einen Korridor wider, für den angenommen wird, dass er den klimatischen Einfluss berücksichtigt. Weiterhin bleibt anzunehmen, dass der steigende Wasserbedarf aufgrund klimatischer Veränderungen durch einen sinkenden Pro-Kopf-Verbrauch kompensiert wird. Eine Überprüfung des Wasserbedarfs hinsichtlich klimatischer Veränderungen wäre nach 10 bis 15 Jahren anzuraten.

### 4.3 Zukünftige Anforderungen und Veränderungen der Trinkwasserqualität

Die Rohwasserbeschaffenheit im Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft wird hauptsächlich durch die geologischen Bedingungen beeinflusst. Daher wird sich die Zusammensetzung des Rohwassers auch in Zukunft nicht wesentlich verändern. Lediglich die Nitratkonzentration könnte durch die Fortführung von Grundwasserschutzprojekten vermindert werden, der sinkende Trend ist bereits erkennbar. Die Zielkonzentration der FWF von 20 mg/L wird aufgrund der ländlichen Strukturen nur schwer ohne weitergehende Aufbereitungsmaßnahmen zu erreichen sein.

Das Rohwasser der FWF ist dem Härtebereich „hart“ zuzuordnen. Ein hoher Gehalt an Härtebildnern führt bei höheren Temperaturen zur Ausfällung insbesondere im Warmwasserbereich der Haushalte. Die zunehmende Technisierung der Haushalte bewirkt, dass ein hoher Härtegrad zur zunehmenden Belastung wird. Die Beseitigung der Kalkablagerungen mit Säure ist mühsam und zum Teil auch schädlich für die Geräte. Das veranlasst immer mehr Haushalte zum Einbau dezentraler Enthärtungsanlagen. Deren Regeneration erfolgt mit hochkonzentrierten Kochsalzlösungen, die eine starke Belastung der Kläranlagen darstellen. Somit geraten Kommunen und Gemeinden zunehmend unter Druck und werden diesen an die Wasserlieferanten, wie die FWF, weitergeben. (Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach, o. J.)

Ein weiterer Grund für den Wunsch der FWF nach einem weicheeren Wasser resultiert aus den unterschiedlichen Härtebereichen der Wasser der verschiedenen Versorgungsbereiche. Die direkten Nachbarversorgungsgebiete von Sulzfeld weisen z. T. eine

Wasserhärte von 2,79 mmol/L auf, was den Zweckverband gegenüber den Gemeinden zukünftig zusätzlich unter Druck setzen könnte. Eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Variante stellt somit nur die zentrale Enthärtung dar.

Bereits jetzt geht der Sachverständigenrat für Umweltfragen von 20 Millionen organischen Verbindungen in der Umwelt aus, von denen bis zu 5.000 Stoffe potentiell umweltrelevant sind. Ein hinzukommen weiterer bislang nicht bewerteter Stoffe, durch eine Verbesserung der instrumentellen Analytik, ist in Zukunft anzunehmen. Der Alterung der Gesellschaft entsprechend wird zukünftig auch der Arzneimittelbedarf ansteigen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Mengenermittlung und Systematisierung von Arzneiwirkstoffen im Rahmen der Umweltprüfung von Human- und Tierarzneimitteln gemäß § 28 AMG“ wurden erstmals Verbrauchsmengen von eingesetzten Arzneimittelwirkstoffen in der Humanmedizin zwischen 2002 und 2009 ermittelt. Insgesamt nahm der Verbrauch der Arzneistoffe um 28 % zu. Die prozentualen Veränderungen der Einzelwirkstoffe variierten dabei zwischen einer Zunahme um 1.306 % für beta-Lactamase-Inhibitoren (ein Arzneimittel, das in Kombination mit Penicillin-Antibiotika verabreicht wird) und einer Abnahme um 66 % für Blutplasmaersatzstoffe. Aber auch Körperpflegemittel, Veterinärarzneimittel, Waschmittel und Industriechemikalien finden zunehmend einen intensiveren Einsatz. Zukünftig ist mit einem steigenden Gefährdungspotential für Ökosysteme durch anthropogene Spurenstoffe zu rechnen. Hygienisch-ästhetische Beeinträchtigungen des Trinkwassers sind ebenfalls nicht auszuschließen. (Bergmann, 2011, S. 10ff)

Laut Bergmann (2011) wird der Trend hin zu einer Eliminierung der Spurenstoffe an der Quelle gehen und weg von einer ausschließlichen Mischwasser-Behandlung. Neben Maßnahmen der Verminderung und Vermeidung an der Quelle sind ggf. auch Maßnahmen innerhalb der Trinkwasseraufbereitung zu ergreifen, um einen ausreichend vorsorgenden Gesundheits- und Verbraucherschutz zu gewährleisten. Vorrangig ist eine Rohwasserqualität anzustreben, die eine Aufbereitung des Rohwassers mit naturnahen Aufbereitungsmethoden erlaubt. Wenn diese beim Auftreten bestimmter Spurenstoffe nicht mehr ausreichen, muss eine Erweiterung der Anlage erfolgen. Zu diesen Verfahren zählen Oxidationsverfahren, Adsorptions- und Filtrationsverfahren oder Membranverfahren.

Auch auf der Ebene der Gesetzgebung könnte es zukünftig Änderungen geben. Seit dem Frühjahr 2015 wird an einer Evaluierung der EG-Trinkwasserrichtlinie gearbeitet. Die erste Phase der Überprüfung der Effektivität, Effizienz und Relevanz der Artikel und Anhänge der Trinkwasserrichtlinie endete im Januar 2016. Dazu führten die Berater der Kommission Umfragen mit nationalen Verbänden und WVU durch. Ein nun vorliegender Evaluierungsbericht schlägt als Erkenntnis der Evaluierungsphase 14 Politikoptionen vor, die die Vorstellungen der künftigen Ausrichtung der Trinkwasserrichtlinie umfassen. Ein Expertenteam reduzierte die Politikoptionen bei einer Sitzung im Januar 2016 auf sechs.



Hinsichtlich zukünftiger Qualitätsanforderungen des Trinkwassers spielen die folgenden zwei Optionen eine wichtige Rolle:

- **Option 1: Parameterliste mit strikten Schwellenwerten**  
Festlegung strikter Schwellenwerte durch WHO-Einstufungen hinsichtlich des gesundheitlichen Risikos
- **Option 2: Risikobasierte Bewertung von der Quelle bis zum Zapfhahn**  
Ableitung der Parameterwerte aus der Risikobewertung in der Prozesskette von der Wassergewinnung bis zur Wasserabgabe für die menschliche Gesundheit, sowohl für die bestehenden Parameter, als auch für neu auftretende Stoffe. (Castell-Exner, 2016b; Castell-Exner, 2016a)

Die Trinkwasserrichtlinie beinhaltet bisher keine Parameter für bspw. Spurenstoffe und endokrin wirksame Verbindungen. Diese stellen zwar eine potentielle Gefahr für die menschliche Gesundheit dar, können aber aufgrund des Standes der Technik und der Wissenschaft nicht aufgenommen werden. Für einige Stoffe existieren bisher nicht genügend Nachweise und noch keine passenden analytischen Methoden, um diese in die Trinkwasserrichtlinie aufzunehmen und für sie Parameterwerte festzusetzen. Ein weiteres Problem stellt der bisher noch unbekannte „Cocktaileffekt“ der Spurenstoffe dar. (Klaassens, Kros, Romkens, de Vries, Hulsmann, & Schellekens, 2015, S. 78ff)

Nach Angaben der EU-Umfrage haben sich die Befragten aller Mitgliedstaaten für eine Überarbeitung der Parameterliste der Trinkwasserrichtlinie im Einklang mit den neusten wissenschaftlichen Entwicklungen und Nachweisen ausgesprochen, auch wenn dies einen Anstieg des Trinkwasserpreises impliziert. Viele neue Parameter wurden von den Befragten vorgeschlagen, welche dem Anhang 1 der Trinkwasserrichtlinie hinzugefügt werden sollen. Die Mehrheit sprach sich jedoch für Substanzen, die in Verbraucherprodukten verwendet werden, Arzneimittel und endokrin wirksame Substanzen aus und betonte, dass diese die wichtigsten zu betrachtenden Stoffe sind. (Klaassens, Kros, Romkens, de Vries, Hulsmann, & Schellekens, 2015, S. 78ff)

Die Evaluierung der EG-Trinkwasserrichtlinie könnte zukünftig zu umfänglichen Veränderungen hinsichtlich des gesetzlichen Rahmens führen. Die Planung einer Trinkwasseraufbereitungsanlage ist ein investitionsreiches Projekt, bei dem eine Langlebigkeit garantiert sein muss. Deshalb müssen die derzeitigen Diskussionspunkte und abzusehenden Entwicklungen in die zukünftigen Wasseraufbereitungs- und Versorgungsplanungen im WW Sulzfeld bzw. Versorgungsbereich Sulzfeld einfließen.

## 5 Entwicklung eines Bewertungssystems

### 5.1 Grundlagen der Bewertungsmethode – Nutzwertanalyse

Die Auswahl eines geeigneten Aufbereitungsverfahrens soll in dieser Arbeit auf Grundlage einer Nutzwertanalyse erfolgen, da sie ein multikriterielles Bewertungsverfahren mit einer transparenten Modellstruktur darstellt. Die Methode orientiert sich an einem mehrdimensionalen Zielsystem, das entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers, komplexe Handlungsvarianten in eine Rangordnung bringt. (Hein, Lévai, & Wencki, 2015, S. 329)

Die Nutzwertanalyse stellt ein klassisches Instrument der Entscheidungsfindung dar. Die Analyse ermöglicht es sowohl monetäre als auch nicht-monetäre Faktoren für die Bewertung zu nutzen. Die Indices werden durch einen dimensionslosen Ordnungsindex, den Nutzwert, ersetzt. Für die verschiedenen Varianten wird bei diesem Bewertungsverfahren ein Gesamt-Nutzwert ermittelt, der sich aus der Addition der gewichteten partiellen Nutzwerte ergibt. (Zimmermann, 2015, S. 47ff)

In Anlehnung an die im Schlussbericht des BMBF/ DVGW-Forschungsvorhabens „Technisch-ökologische und ökonomische Evaluierung alternativer Wasseraufbereitungsverfahren an den Beispielen Arsenelimination und zentrale Trinkwasserenthärtung“ formulierten Arbeitsschritte wird die Bewertung in dieser Arbeit, wie folgt strukturiert (nach (Technische Universität Berlin, 2004, S. 47ff)):

- 1) Problemanalyse und Rahmenbedingungen
  - Zukünftige Defizite und Effekte
  - Problemursachen
  - Mögliche Problemlösungen
  - Möglichkeiten der Beeinflussung
  - Bauliche Voraussetzungen
  - Eigenwassergewinnung - Rohwasserdargebot und wasserrechtliche Bewilligung
  - Fremdwasserbezug - Wasserlieferungsverträge
  - Rechtliche Vorgaben
  - Bestehende Aufbereitung (technische Kapazität)
  - Ver- und Entsorgungssituation
- 2) Mindestanforderungen und Vorauswahl der Aufbereitungsvarianten
- 3) Beschreibung der Aufbereitungsvarianten
- 4) Bewertung
  - Aufstellung eines Zielsystems (Definition der Ziele und Kriterien)
  - Ziel- und Kriteriengewichtung
  - Bestimmung der Zielfunktionen

- Bewertung - Ermittlung des Gesamtnutzwertes, Rangordnung der Varianten
- 5) Sensitivitätsanalyse
  - Stärken und Schwächen der Methodik
- 6) Empfehlung

## 5.2 Problemanalyse und Rahmenbedingungen

Der Vergleich zwischen derzeitigem Wasserbedarf und dem Wasserbedarf bis zum Jahr 2040 zeigt eine tägliche Wassermengendifferenz von 800 m<sup>3</sup>, die sich in der Tagesspitze auf eine fehlende Menge von 5.900 m<sup>3</sup> erhöhen kann (Vergleich Anhang 15). Die Hauptursache für den zukünftig höheren Wasserbedarf liegt in den angenommenen Neuanschlüssen und der Annahme der Vollversorgung bislang teilversorgter Orte. Insgesamt wird eine täglich mittlere Wassermenge von 21.000 m<sup>3</sup>/d benötigt (bei 31.200 m<sup>3</sup>/d maximalem Wasserbedarf). Das derzeitige Wasserdargebot (bewilligte Eigenwasserentnahmemenge und vertraglich geregelter Fremdwasserbezug) kann diese Menge decken. Zukünftig ist eine größere Förderung des Eigenwassers vorgesehen, um die Bewilligung zur Entnahme von 6.500.000 m<sup>3</sup>/a aufrecht zu erhalten (bisher wurden durchschnittlich nur 42 % der bewilligten Jahreswassermenge genutzt). Der Fremdwasserbezug soll deutlich reduziert werden oder entfallen. Der durchschnittliche Jahreswasserbedarf bis zum Jahr 2040 beträgt 7.660.000 m<sup>3</sup> und übersteigt die Bezugsrechte der WGA Sulzfeld-Marktsteft um 1.160.000 m<sup>3</sup> pro Jahr. Diese Menge muss von anderen Quellen bezogen werden. Zur quantitativen Deckung des zukünftigen Wasserbedarfs ergeben sich folgende Möglichkeiten:

1. Eigenwassergewinnung und Fremdwasserbezug vom WFW (Fortführung der jetzigen Situation)
2. Erweiterung der Eigenwassergewinnung durch eine Grundwasseranreicherung mit Mainwasser im Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft (ohne Fremdwasserbezug von der WFW)

Bereits zum jetzigen Zeitpunkt sind organische anthropogene Spurenstoffe im Rohwasser nachweisbar. Eine steigende Eigenwasserentnahme oder eine künstliche Grundwasseranreicherung würden die Notwendigkeit einer organischen Spurenstoffentfernung erhöhen. Es ist davon auszugehen, dass zukünftig weitere gesetzliche Anforderungen an das Trinkwasser hinsichtlich unerwünschter organischer Spurenstoffe gestellt werden. Dies begründet die Wiederaufnahme der Planung einer weitergehenden Aufbereitungsanlage im WW Sulzfeld. Verfahren, wie die Aktivkohlefiltration ggf. in Kombination mit einer Ozonung, die Nanofiltration (NF) und die Niederdruckumkehrosmose (LPRO) bieten eine Entfernung der unerwünschten organischen Spurenstoffe.

Das Rohwasser der FWF ist vorwiegend durch die Geologie des Untergrundes geprägt, mit einer Härte von 5,54 bis 6,12 mmol/L (31,1 bis 34,4 °dH). Zukünftig soll das Eigenwasser auf eine Zielhärte von 2,31 mmol/L (13 °dH) enthärtet werden. Mögliche

Enthärtungsverfahren stellen die Fällungsverfahren (Langsamentcarbonisierung und Schnellentcarbonisierung), die Membranverfahren (NF und LPRO) und die Ionenaustauschverfahren dar.

Weiterhin sind alle Grenzwerte der TrinkwV 2001 einzuhalten. Dabei sind insbesondere die Sulfatkonzentrationswerte zu beachten, deren Maximalwerte im Rohwasser in der Vergangenheit teilweise den vorgegebenen Grenzwert von 250 mg/L überschritten haben. Eine Sulfatentfernung wird bei Ionenaustauschverfahren, wie dem CARIX-Verfahren und den Membranverfahren NF und LPRO sichergestellt.

Eine Reduktion der Nitratkonzentration auf < 18,6 mg/L ist ebenfalls anzustreben, damit zukünftig auch beim Einsatz schmelztauchverzinkter Eisenwerkstoffe keine erhöhte Korrosionswahrscheinlichkeit vorliegt. Dieses Ziel kann in dem ländlich geprägten Versorgungsbereich nur schwer durch alleinige Vorsorgemaßnahmen erfüllt werden. Durch Aufbereitungsmaßnahmen, wie die LPRO-Anlage oder den CARIX-Ionenaustauscher kann der Nitratgehalt vermindert werden.

Für die Erweiterung der bestehenden Aufbereitungsanlage Sulzfeld steht bereits ein Grundstück südlich des Maschinenhauses zur Verfügung (Grundstücksgrenzen WW Sulzfeld entspricht der roten Linie in Abbildung 19). Ein Bauentwurf wurde bereits erstellt. Das Gebäude soll unterkellert werden und hat eine lichte Grundrissfläche von 30,80 x 33,60 m. Die Unterbringung der Aufbereitungsanlage ist im Erdgeschoss vorgesehen, dieses hat im Bereich der Aufbereitungshalle eine Geschosshöhe von 7,0 bis 10,80 m. (INSUMMA - SHP - Pfenning, 2005, S. 17ff)

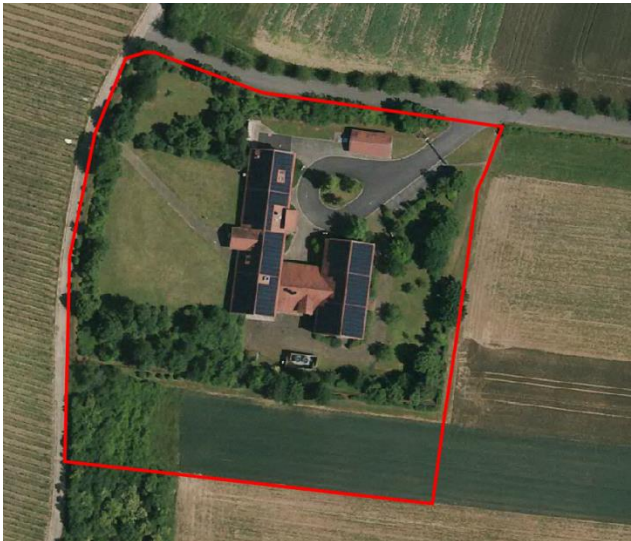


Abbildung 19: Luftbild WW Sulzfeld

Weitere Rahmenbedingungen wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten der Bestandsaufnahme dargestellt. Kurz zusammengefasst gehören dazu:

- die wasserrechtliche Bewilligung der WGA Sulzfeld-Marktsteft bis 2020 mit 6.500.000 m<sup>3</sup>/a (33.330 m<sup>3</sup>/d;  $Q_{\max}$ : 350 L/s; max.  $Q_{\max}$ : 385 L/s)
- die zwei Wasserlieferungsverträge mit der WFW bis 2023 über 7.884.000 m<sup>3</sup>/a (entspricht 250 L/s;  $Q_{\max}$ : 21.600 m<sup>3</sup>/d;  $Q_{\min}$ : 4320 m<sup>3</sup>/d) abzgl. dem Verbrauch des Versorgungsbereichs Hüttendorf mit 25 L/s bis 55 L/s
- die Wasserbedarfsprognose bis zum Jahr 2040 (siehe Abschnitt 4.1 und Abschnitt 4.2)
- die Beschaffenheit des Rohwassers, welche sich aufgrund der Geologie des Untergrundes nicht weiter ändern wird, eine zukünftig größere Eigenwasserförderung oder künstliche Grundwasseranreicherung wird nur die Relevanz der organischen Spurenstoffe erhöhen
- die Beschaffenheit des WFW-Wassers, welche als gegeben hingenommen werden muss (Lieferung in Trinkwasserqualität)
- die bestehenden Wasserleitungen zur Lieferung des WFW-Wassers
- die Turbine auf der Wasserleitung des WFW-Zulaufs im WW Sulzfeld zur Energieerzeugung
- die derzeitige Aufbereitungstechnik des WW Sulzfeld.

### 5.3 Mindestanforderungen und Vorauswahl von Aufbereitungsvarianten

Aus der Problemanalyse gehen folgende eventuell miteinander kombinierbare Aufbereitungs- und Versorgungsoptionen hervor:

- Eigenwassergewinnung im Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft
- Künstliche Grundwasseranreicherung
- Fremdwasserbezug von der WFW
- Schnellentcarbonisierung
- Langsamentcarbonisierung
- Filtration über gekörnte Aktivkohle ggf. in Kombination mit einer Ozonung
- Ionenaustauschverfahren mittels CARIX
- Membranfiltration mittels Nanofiltration (NF)
- Membranfiltration mittels Niederdruckumkehrosmose (LPRO)

Um die zu bewertenden Varianten einzugrenzen, werden Mindestanforderungen, so genannte „K.o.-Kriterien“, formuliert, die eingehalten werden müssen. Somit lässt sich eine Vorauswahl der Aufbereitungsvarianten treffen, denn bei nicht Einhalten der Mindestanforderungen, werden die Varianten außer Acht gelassen. (Technische Universität Berlin, 2004, S. 49)

Folgende Mindestanforderungen müssen erfüllt werden:

- Die Wasserversorgung muss auch bei Ausfall einer Quelle bzw. eines Zulaufs zum WW gewährleistet sein.
- Eine Weiternutzung der bestehenden Aufbereitungstechnik (Oxidatoren, Einschnittfilter) beschränkt den Rohwasserzulauf zum WW auf 365 L/s.
- Die neue Aufbereitungstechnik muss eine Entfernung der organischen Spurenstoffe gewährleisten.
- Die neue Aufbereitungstechnik muss das Eigenwasser auf eine Gesamthärte von 2,31 mmol/L (13 °dH) enthärten.
- Die neue Aufbereitungstechnik muss eine Teilentsalzung gewährleisten.

Diese formulierten Mindestanforderungen grenzen die Einzeloptionen ein.

Die bevorzugte Weiternutzung der bestehenden Aufbereitungstechnik als Vorbehandlungsstufe ist bei Anwendung einer künstlichen Grundwasseranreicherung, aufgrund der Zulaufmengen nicht möglich. Die technische Aufbereitungskapazität der Anlage würde, insbesondere an Spitzentagen, überschritten werden. Weiterhin wäre keine ausreichende Versorgungssicherheit beim Ausfall der Brunnenleitung gegeben. Somit besteht in Zukunft nur die Möglichkeit den Wasserbedarf durch einen Fremdwasserbezug von der WFW zu decken.

Eine Kombination aus Eigenwassergewinnung, Fremdwasserbezug und künstlicher Grundwasseranreicherung wäre bzgl. der Versorgungssicherheit am günstigsten, aufgrund der Betriebskosten und weiteren Investitionskosten für eine weitergehende Aufbereitung ist die Variante jedoch auszuschließen und wird nicht weiter betrachtet.

Die Schnell- und Langsamentcarbonisierung ermöglichen die Enthärtung des Wassers, jedoch keine Senkung der Sulfat- oder Nitratkonzentrationen und keine Entfernung der organischen Spurenstoffe. Letztere könnten in Kombination mit einer Aktivkohlefiltration entfernt werden. Eine Teilentsalzung wird damit jedoch nicht erreicht. Ein weiterer Grund weshalb die Verfahren nicht weiter untersucht werden, stellen die hohen Sulfat- und Chloridkonzentrationen der Rohwasser dar, die zu einem stark korrosiven Trinkwasser führen würden (Sixt, Heiß + Partner GbR Ingenieurbüro, 2005, S. 4). Weiterhin ist der Platzbedarf für bspw. eine Langsamentcarbonisierung sehr hoch. Folglich können die Fällungsverfahren außer Acht gelassen werden.

Auch das CARIX-Verfahren gewährleistet keine organische Spurenstoffentfernung lediglich eine Enthärtung und Teilentsalzung. Deshalb kann dieses Verfahren nur in Kombination mit einer Aktivkohlefiltration angewandt werden. Hierbei wird eine Anwendung in Kombination mit Ozonung und ohne Ozonung bewertet.

Die Membranverfahren, NF und LPRO, erfüllen grundsätzlich die Mindestanforderungen.

Die bestehende Aufbereitungstechnik im WW Sulzfeld als alleinige Aufbereitungsvariante wird als „bedenklich“ eingestuft. Sie stellt nur eine Option dar, weil sie bereits im

WW Sulzfeld eingebaut ist und funktioniert. Die Anlage erfüllt jedoch nicht die zukünftigen Mindestanforderungen.

Anhand der Mindestanforderungen konnten die möglichen Varianten herausgefiltert werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese eingehend beschrieben und anschließend bewertet, um die beste Aufbereitungsmethode für das WW Sulzfeld zu finden:

- Variante 1: Aktivkohle und CARIX-Anlage
- Variante 2: Ozonung, Aktivkohle und CARIX-Anlage
- Variante 3: NF-Anlage
- Variante 4: LPRO-Anlage

Die Rohwasseranalysen geben bereits Aufschluss darüber, ob eine Aufbereitungstechnik prinzipiell für die Aufbereitung des Wassers geeignet ist, oder ob eine vorhergehende Aufbereitung des Rohwassers erforderlich ist.

Das DVGW Arbeitsblatt W 235-1 enthält die nachstehende Tabelle 17 (DVGW W 235-1 (A), 2009, S. 20) mit Rohwasseranforderungen für den Ionenaustauscher und die Membranfiltration. Ein Vergleich der Rohwasserqualität aus Abschnitt 3.6.1 zeigt, dass das Rohwasser für beide Enthärtungsverfahren geeignet ist.

Tabelle 17: Rohwasseranforderungen von Ionenaustausch- und Membranverfahren

Bewertungskriterien		Verfahren	
		Ionenaustauschverfahren <sup>a</sup>	Membranverfahren NF/UO
Rohwasserseitige Anforderungen	Fe <sup>2+</sup>	< 0,1 mg/l	< 0,05 mg/l <sup>c</sup>
	Fe <sup>3+</sup>	< 0,1 mg/l	< 0,05 mg/l <sup>b</sup>
	Mn <sup>2+</sup>	< 0,1 mg/l	< 0,02 mg/l <sup>c, b</sup>
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	< 1 mg/l	–
	Trübung,	< 5 FNU	< 1 FNU
	TOC bzw. DOC	< 3 mg/l	–
	Al <sup>3+</sup>	möglichst gering	möglichst gering <sup>b</sup>
	Sr <sup>2+</sup>	–	möglichst gering <sup>b</sup>
	Ba <sup>2+</sup>	–	möglichst gering <sup>b</sup>
	Silikate	–	möglichst gering <sup>b</sup>
	K <sub>S4,3</sub>	–	–
	K <sub>S4,3</sub> /Ca <sup>2+</sup>	–	–
	SDI	–	< 3

<sup>a</sup> hier: schwach saure Kationenaustauscher, die mit einem stark basischen Anionenaustauscher kombiniert und als Mischbett betrieben werden (in der Literatur als CARIX<sup>®</sup>-Prozess bezeichnet, bei dem die Ionenaustauscherharze mit Kohlensäure besonders effizient regeneriert werden)

<sup>b</sup> Wenn das Wasser diesen verfahrenstypischen Anforderungen nicht entspricht, muss eine Voraufbereitung zur Entfernung dieser Stoffe erfolgen, oder es müssen zur Vorbeugung einer Membranverblockung (Scaling) Kristallisationsinhibitoren (Antiscalants), eingesetzt werden. Die Parameter Strontium bzw. Barium sind diesbezüglich zumindest dann als kritisch anzusehen, wenn im Konzentrat des zu behandelnden Wasser die Löslichkeit für Bariumsulfat bzw. Strontiumcarbonat überschritten ist.

<sup>c</sup> Sauerstofffreies Wasser kann mit vergleichsweise höherer Konzentration an Eisen(II), Mangan(II) und DOC aufbereitet werden.

## 5.4 Beschreibung der Aufbereitungsvarianten

In diesem Abschnitt werden die in der Vorauswahl festgelegten Varianten eingehend beschrieben. Da die Kenndaten einer Aufbereitungsanlage in Abhängigkeit von der Rohwasserqualität, dem Wasserbedarf, der gewünschten Aufbereitungsqualität und äußeren Einflussfaktoren z. B. rechtlichen Bestimmungen stark variieren können, ist ein Vergleich von allgemeinen Literaturwerten nicht zweckmäßig. Denkbar ist jedoch ein Vergleich der Kenndaten von Aufbereitungsanlagen, die dem WW Sulzfeld ähnlich sind. Allerdings gibt es für die Aufbereitungsverfahren CARIX, LPRO und Nanofiltration in Deutschland noch keine Anlagen, die der Größe und der Ausgangsrohwasserqualität des WW Sulzfeld ähneln. Daher erfolgte die Erhebung der Eckdaten zum Vergleich der Varianten untereinander durch eine grobe Dimensionierung bzw. Berechnung.

Die nachfolgenden Abgabemengen stellen die Bemessungsgrundlage für die Bewertung der Varianten dar:

<b><math>Q_a</math>, Trinkwasser</b>	<b>7.655.000 m<sup>3</sup>/a</b>
<b><math>Q_d</math>, mittel</b>	<b>21.000 m<sup>3</sup>/d</b>
<b><math>Q_d</math>, Eigenwasser</b>	<b>13.000 m<sup>3</sup>/d</b>
<b><math>Q_d</math>, Fremdwasser</b>	<b>8.000 m<sup>3</sup>/d</b>
<b><math>Q_h</math>, Trinkwasser mittel</b>	<b>1.050 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Laufzeit der Anlage</b>	<b>20 h/d</b>

Eine weitere Annahme, die für alle Varianten gilt, sind die Energiekosten. Sie werden in der Kostenschätzung mit 0,16 €/kWh angenommen.

Die Ausgangsdaten der LPRO- und CARIX-Anlage wurden vom Unternehmen „VEOLIA water technologies“ zur Verfügung gestellt. Eine weitere Grundlage bot die geplante „Erweiterung der Aufbereitungsanlage im WW Sulzfeld“ des Ingenieurbüros Sixt, Heiß und Partner GbR aus dem Jahr 2005.

### 5.4.1 Ionenaustauschverfahren CARIX – Varianten 1 und 2

#### Kurzbeschreibung der Anlage (Aufbau und Funktion)

Das Ionenaustauschverfahren „CARIX“ ist ein Mischbettverfahren bestehend aus einem schwachen sauren Kationenaustauscher und einem stark basischen Anionenaustauscher. Die Austauscherharze befinden sich in Form von Kunststoff-Kügelchen (Durchmesser ca. 1 mm) in den Austauschbehältern. Bei Kontakt mit Wasser werden diese aktiviert. Ein mit Kohlenstoffdioxid angereichertes Wasser wird unter Druck dem Austauscher zugeführt, sodass Kohlensäure entsteht, die sich in Oxonium- und Hydrogencarbonat-Ionen umsetzt. Bei Kontakt mit den Harzen wird die Oberfläche des Kationenaustauschers mit Oxonium-Ionen beladen und die Oberfläche des Anionenaustauschers mit Hydrogencarbonat-Ionen. (DVGW W 253-3 (A), 2012, S. 11f; Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach, o. J.)



Wird das salzhaltige Rohwasser dem Austauscher zugeführt, haften die zweitwertigen Kationen Calcium und Magnesium an der Oberfläche des Kationenaustauschers und die Anionen Sulfat, Nitrat und Chlorid (in Reihenfolge) an der Oberfläche des Anionenaustauschers. Gleichzeitig wird die äquivalente Menge an Kat- bzw. Anionen von den Austauschern in das Wasser abgegeben. Es entsteht Kohlensäure, die in Wasser und Kohlenstoffdioxid zerfällt. Letztere führt zu einem sehr hohen Calcitlösevermögen des Wassers. In einer Nachbehandlung wird das Wasser physikalisch entsäuert z. B. Flachbettbelüfter oder Riesler. (DVGW W 253-3 (A), 2012, S. 11)

Wenn die Wirksamkeit der Austauscher nachlässt und diese mit den Ionen des Rohwassers beladen sind, müssen sie regeneriert werden. Dazu wird Rohwasser in den Regenerierspeicher gepumpt und mit Kohlenstoffdioxid aus der Rückgewinnung und dem Vorratsbehälter angereichert. Die übersättigte Kohlenstoffdioxid-Lösung wird bei einem Überdruck von 5 bar im Aufwärtsstrom dem zu regenerierenden Filter zugeführt. Die Regeneration erfolgt im umgekehrten Prinzip (Oxonium- und Hydrogencarbonat-Ionen gegen die Salze). (DVGW W 253-3 (A), 2012, S. 12)

Die Abbildung 20 (Sauer, 2015, S. 10) stellt den Vorgang der Beladung und der Regeneration dar.

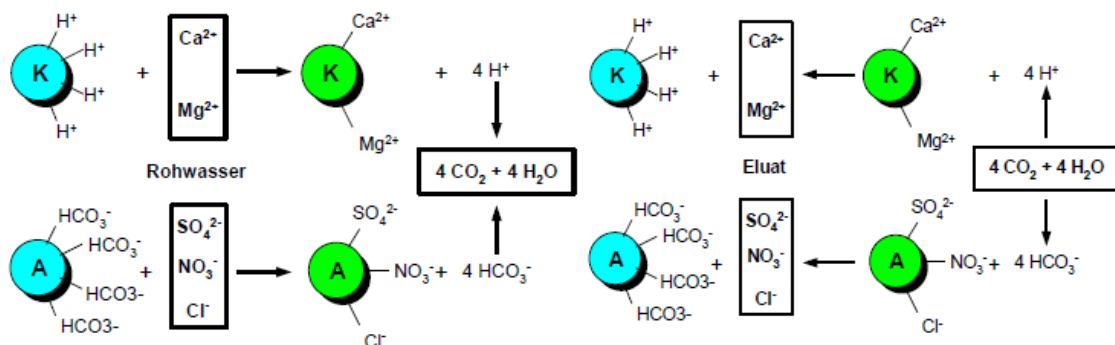


Abbildung 20: Prinzip einer CARIX-Anlage (links: Beladung; rechts: Regeneration)

Das Abwasser enthält demnach nur die Salzmenge, welche zuvor aus dem Rohwasser entfernt wurde und ist frei von Regenerierchemikalien. Es wird nach der Regeneration einem Entgaser zugeführt, der einen Großteil des gelösten Kohlenstoffdioxids zurückgewinnt (zu ca. 95 %) und es in einen Zwischenbehälter pumpt. Das entgaste Eluat wird zum Vorfluter geleitet. Bei einer eventuellen Ausfällung von Calciumcarbonat und Calciumsulfat kann sich die Salzfracht weiter verringern. (Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach, o. J.)

Abbildung 21 (Technische Universität Berlin, 2004, S. A.43) stellt ein vereinfachtes Fließschema einer CARIX-Anlage dar.

Die CARIX-Anlage verfügt über 30 Jahre Betriebserfahrung, denn 1986 ging die erste Aufbereitungsanlage in Bad Rappenau in Betrieb. Derzeit gibt es in Deutschland 15 CARIX-Anlagen, deren Anlagendurchsätze zwischen 50 und 600 m³/h variieren. Das WW Sulzfeld würde diese Durchsätze deutlich übersteigen. (Sauer, 2016, S. 4)

Das Verfahren erlaubt lediglich eine Enthärtung und Teilentsalzung und keine organische Spurenstoffentfernung.

Um eine Spurenstoffentfernung gewährleisten zu können, muss die CARIX-Anlage mit einer Aktivkohlefiltration kombiniert werden. Einige polare Stoffe können ohne vorherige Ozonung nicht in ausreichendem Maße entfernt werden. Daher wird das CARIX-Verfahren in Form von zwei Varianten bewertet, mit und ohne Ozonung.

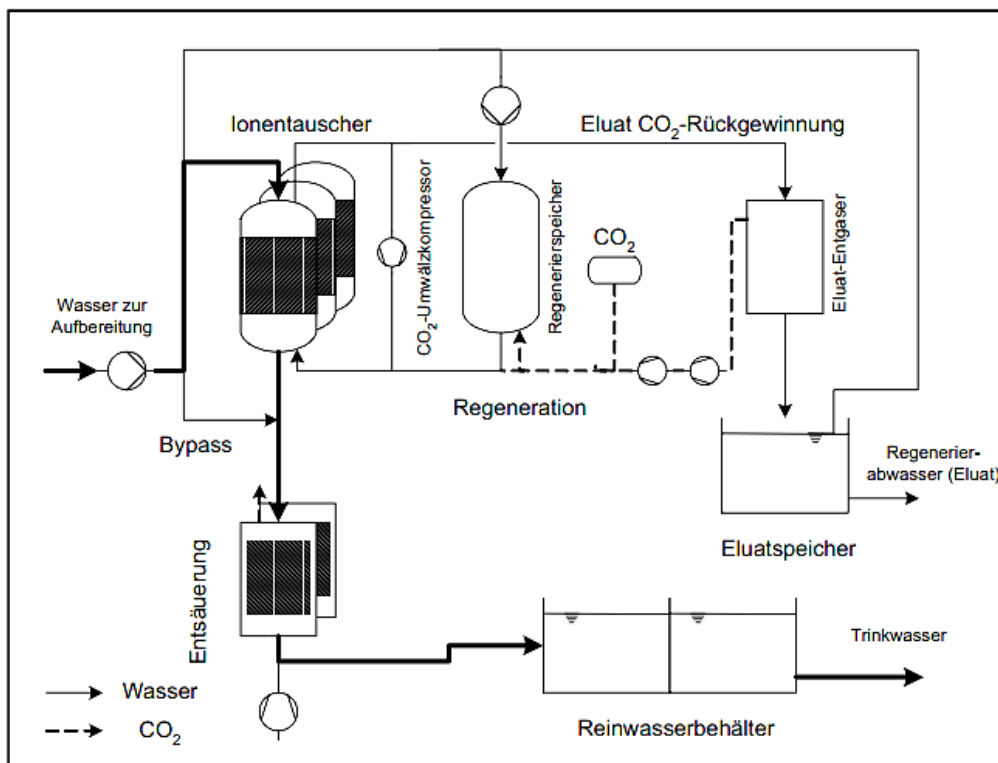


Abbildung 21: vereinfachtes Fließschema einer CARIX-Anlage

#### 5.4.1.1 Variante 1: Aktivkohle und CARIX

##### Kurzbeschreibung Aktivkohle

Der Einsatz der Aktivkohle dient neben der adsorptiven Entfernung von Geruchs-, Geschmacks- und Farbstoffen insbesondere der Entfernung organischer Spurenstoffe. Die Entfernungsrates ist umso höher, je unpolarer die organischen Stoffe sind. Während des Durchströmens des Filters bildet sich eine Arbeitszone aus, die den Stofftransport aus der Lösung in das Korn mit anschließender Anlagerung an der Kornoberfläche darstellt. Nach einer gewissen Beladungszeit kommt es zum Durchbruch, das heißt, dass die Arbeitszone das Ende des Filters erreicht hat. Schlecht adsorbierbare Spurenstoffe

brechen früher durch als gut adsorbierbare Spurenstoffe. Das Vorhandensein schlecht adsorbierbarer Spurenstoffe begrenzt die Laufzeit des Filters. Damit ist eine häufigere Regeneration des Filters notwendig, um diese Stoffe zurückzuhalten. Das Adsorptionsverhalten von Einzelstoffe kann durch Adsorptionsisothermen beschrieben werden. Diese sind experimentell bestimmbar. Treten in einem Rohwasser konkurrierende Spurenstoffe aus, so kann das Adsorptionsverhalten deutlich von den Adsorptionsisothermen abweichen. (DVGW W 239 (A), 2011; Technologiezentrum Wasser (TZW), 2007)

Als Aktivkohle wird grundsätzlich Kornkohle eingesetzt. Pulveraktivkohle findet nur bei zeitlich begrenzten stoßartigen Belastungen oder der Beseitigung von Havariesituationen Einsatz. (Technologiezentrum Wasser (TZW), 2007)

Das WW Uehlfeld wird bereits mit Aktivkohlefiltration betrieben. Die Erfahrung zeigt, dass die Filter nach ca. 2 a regeneriert werden müssen. Laut Laborleiterin Frau Dr. Konrad gibt es in Sulzfeld keinen direkten Störstoff. Demnach kann auch hier eine Laufzeit der Filter von 2 a angenommen werden.

### **Quantitative Eckdaten**

Abbildung 22 zeigt die benötigten Wassermengen für die Variante 1: Aktivkohle und CARIX. Das Eigenwasser wird im Vollstrom über die Aktivkohle gefahren. Vor dem Zulauf zu den Ionenaustauschern wird bereits das Fremdwasser zugeleitet, um die Energiekosten der Anlage möglichst gering zu halten (durch eine Verlängerung der Beladungszeit und geringere Häufigkeit der Aufstrom-Regeneration), die Ablaufkonzentrationswerte des Trinkwassers und die Konzentrationswerte des Eluats zu verbessern und die Nutzungsdauer der Anlage zu verlängern. Die Ausbeute der CARIX-Anlage wird mit 92 % angenommen. Das Verhältnis von Abwasseranfall zu Trinkwasserabgabe beträgt 8,6 %.

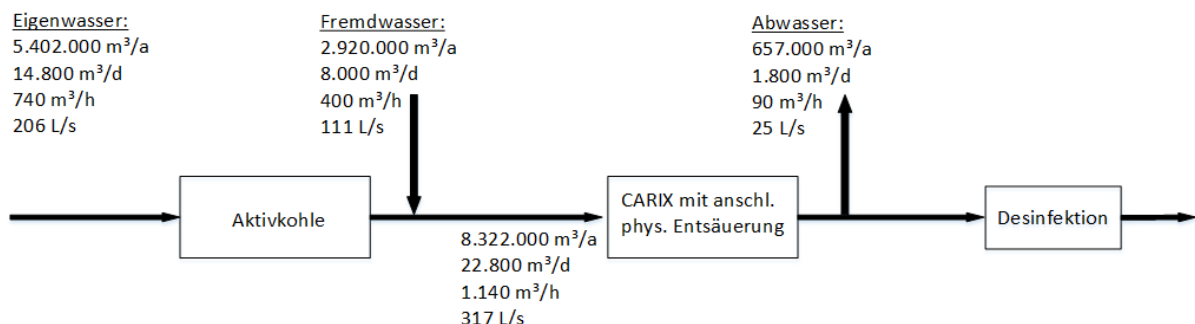


Abbildung 22: Fließschema der Aufbereitungsvariante Aktivkohle und CARIX

### **Qualitative Eckdaten**

Die chemischen Aufbereitungsparameter stammen aus der Vorstudie zur zentralen Enthärtung des Trinkwassers im WW Sulzfeld. (Sauer, 2016, S. 9)

Zur Prüfung der Entfernbarkeit der anthropogenen organischen Spurenstoffe wurden nur Daten zu den im Rohwasser positiv nachgewiesenen Stoffen der Einzeluntersuchung aus dem Jahr 2010 ermittelt. Weitere laut Eigenüberwachungsverordnung Bayern jährlich zu untersuchende PSM-Wirkstoffe werden hier nicht auf Entfernbarkeit geprüft. Die PSM-Wirkstoffe liegen zum einen unter den Grenzwerten der TrinkwV 2001 und konnten zum anderen nur in den Wassern der Einzelbrunnen (S1, HM und HS) nachgewiesen werden (siehe Kapitel 3.6.4.).

Die Trinkwasserqualität am WW-Ausgang kann der nachfolgenden Tabelle 18 entnommen werden.

Tabelle 18: Variante 1 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang

Parameter		Einheit	Trinkwasser- qualität am WW- Ausgang	Quelle
Säurekapazität		mmol/L	2,9	(Sauer, 2016, S. 9)
Basenkapazität		mmol/L	0,2	(Sauer, 2016, S. 9)
pH-Wert			7,6	(Sauer, 2016, S. 9)
Gesamthärte		mmol/L	2,3	(Sauer, 2016, S. 9)
Nitrat		mg/L	20	(Sauer, 2016, S. 9)
Chlorid		mg/L	38	(Sauer, 2016, S. 9)
Sulfat		mg/L	64	(Sauer, 2016, S. 9)
Calcitlösekapazität		mg/L	0	(Sauer, 2016, S. 9)
Korrosions- chemischer Quotient S1		[-]	0,9	(Sauer, 2016, S. 10)
Organische Spurenstoff- entfernung	Carbamazepin	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Haist-Gulde, 2014, S. 10ff; Jekel, 2013, S. 7)
	Röntgenkontrastmittel (1: Iopamidol, 2: Amidotrizoesäure)	[-]	Gering (1: mittel; 2: keine bis gering)	(Haist-Gulde, 2014, S. 10ff; Jekel, 2013, S. 7)
	N, N-Dimethylsulfamid	[-]	Keine	(Haist-Gulde, 2014, S. 9; Brauch, 2008, S. 38)
	EDTA	[-]	Keine	(Haist-Gulde, 2014, S. 10ff; Jekel, 2013, S. 7)
	Chloridazon Metabolit B und B1	[-]	Hoch	(Haist-Gulde, 2014, S. 10ff; Brauch, 2008, S. 38)

Die Kornaktivkohleadsorption ist bei der Entfernung von PSM-Wirkstoffen, wie Tolyfluanid, Isoproturon, Bentazon, Metazachlor, Atrazin, Desethylatrazin gut bis sehr gut wirksam. (Brauch, 2008, S. 38; Lenntech, 2016)

Fraglich ist, wie sich die DMS-Konzentration im Rohwasser zukünftig entwickelt (bereits jetzt ist der GOW überschritten), insbesondere bei einer höheren Eigenwassergewinnung. Zusätzlich verringert sich der Fremdwasserzulauf. Somit bleibt zu überprüfen, ob eine alleinige adsorptive Entfernung der Spurenstoffe als Aufbereitungsschritt ausreichend ist.

### Abwasserzusammensetzung

Das Abwasser der CARIX-Anlage, auch Eluat genannt, enthält nur die entfernten Stoffe aus dem Rohwasser in aufkonzentrierter Form. Ausschlaggebend für die Gewässer-einleitung sind die Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen bzw. -frachten. Die Berechnungsergebnisse werden nachfolgend in Tabelle 19 dargestellt. Die Konzentrationswerte des Trinkwassers der CARIX-Anlage wurden von Herrn Sauer bereitgestellt. (Sauer, 2016, S. 11)

Tabelle 19: Variante 1 - Abwasserzusammensetzung

<b>Trinkwasser</b>	<b>m³/d</b>	<b>21.000</b>		
<b>Rohwasser</b>	<b>m³/d</b>	<b>22.800</b>		
<b>Abwasser</b>	<b>m³/d</b>	<b>1.800</b>		
		<b>RW</b>	<b>TW</b>	<b>Eluat</b>
Nitrat	mg/L	25	20	83
$M = 62,0004 \text{ g/mol}$	kg/d	570	420	150
<b>Stickstoff</b>	<b>mg/L</b>	6	5	<b>19</b>
$M = 14,007 \text{ g/mol}$	<b>kg/d</b>	129	95	<b>34</b>
Phosphat	mg/L	0	0	0
$M = 94,97 \text{ g/mol}$	kg/d	0	0	0
<b>Phosphor</b>	<b>mg/L</b>	0	0	<b>0</b>
$M = 30,974 \text{ g/mol}$	<b>kg/d</b>	0	0	<b>0</b>

Eine wasserrechtliche Genehmigung zur Einleitung des Eluats in den Vorfluter muss vorab beantragt werden, hierbei sei gesagt, dass alle bislang in Betrieb genommenen CARIX-Anlagen die Erlaubnis zur Direkteinleitung in den Vorfluter erhielten. Da die Einleitgenehmigung abhängig ist von den bestehenden Frachten anderer Einleiter in den Main, kann vorab nicht eindeutig gesagt werden, ob die Genehmigung von der zuständigen Behörde erteilt wird. Einen Anhaltspunkt bietet die Abwasserverordnung AbwV, die die Mindestanforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer beschließt. Für häusliches und kommunales Abwasser sind die Stickstoff- und Phosphorgrenzwerte in Abhängigkeit von der BSB-Fracht festgelegt. Für eine Abwasserbehandlungsanlage der Größenklasse 4 sind eine Stickstoffkonzentration von 18 mg/L und eine Phosphorkonzentration von 2 mg/L einzuhalten. Das Abwasser der CARIX-Anlage würde somit den Phosphorgrenzwert einhalten, der Stickstoffgrenzwert wäre überschritten.

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für Variante 1 erfolgt mit Hilfe der Ausgangsdaten der FWF-Vorstudie (Sauer, 2016, S. 13f). Alle in der Vorstudie getroffenen Annahmen beruhen auf Erfahrungswerten. Die detaillierte Kostenschätzung kann für alle Varianten dem Anhang 16 entnommen werden.

Sie untergliedert sich in „variable Betriebskosten“ und „Fixkosten“ bestehend aus den „Fixkosten Betrieb“ und „Fixkosten Investition und Abschreibung“.

Zu den „variablen Betriebskosten“ zählen die Energiekosten für die Brunnenpumpen und die Aufbereitungsanlage, sowie der Kohlenstoffdioxid-Bedarf. Die „Fixkosten Betrieb“ untergliedern sich nur in die Kosten für die Regeneration der Aktivkohle und die Abwasserabgabe. Die Abwasserabgabe wird über das bundesweit geltende Abwasserabgabegesetz geregelt. Es legt die Höhe der Abgabe im Wert von 35,79 € pro Schadeinheit fest. Die Stickstoff- und Phosphorfrachten, die einer Schadeinheit entsprechen, werden im Abwasserabgabegesetz bestimmt. Seine Ausführung wird durch die Länder geregelt und kann durch diese weiter spezifiziert werden. In Bayern ist die ausführende Behörde die Kreisverwaltungsbehörde. Sobald die wasserrechtliche Erlaubnis zur Einleitung von Abwasser in ein Gewässer erteilt ist, muss der „Einleiter“ entsprechend der einleitenden Schadeinheiten bzw. Frachten die Abgabe entrichten. (Schindler, 2016)

Die „Fixkosten Investition und Abschreibung“ setzen sich aus den Kosten der technischen Ausrüstung, der Planung, der Gebäude, Haustechnik und den Abschreibungen zusammen. Für die Abschreibung der Verfahrenstechnik wurde für alle Varianten eine Dauer von 25 Jahren und für die Abschreibung der Gebäude, Haustechnik etc. eine Dauer von 40 Jahren angenommen.

Die Kostenschätzung für Variante 1: Aktivkohle und CARIX ergibt folgende Werte:

Tabelle 20: Variante 1 - Kostenschätzung

Variable Betriebskosten	€/a	739.000
	Cent/m <sup>3</sup>	9,64
Fixkosten	€/a	941.000
	Cent/m <sup>3</sup>	12,27

### **Weitere Informationen**

Für das Ionenaustauschverfahren CARIX existiert das Arbeitsblatt DVGW W 235-3, außerdem besitzt das Verfahren eine Zulassung gemäß der KTW-Leitlinie (Leitlinie zur hygienischen Beurteilung von organischen Materialien in Kontakt mit Trinkwasser) des Umweltbundesamtes. Diese stellt keine Rechtsnorm dar, aber entspricht dem Stand der Wissenschaft und Technik laut TrinkwV 2001. (Sauer, 2016, S. 6; Greger, 2016a)

Die CARIX-Anlage weist über die Lebenszeit eine Kohlenstoffdioxid-Emission von 161 g CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> auf. Die Aufbereitungstechnik hat einen hohen Raumbedarf für die Ionenaustauschfilter, Regenerierspeicher, Eluatentgaser und Reinwasserriesler. (Sauer, 2016, S. 8ff; DVGW W 235-1 (A), 2009, S. 24)

Beim CARIX-Verfahren in Kombination mit Aktivkohle werden außer Kohlenstoffdioxid keine weiteren Zusatzstoffe benötigt. Demnach ist von keiner Gefahr für die Umwelt auszugehen. Der Einsatz von Kohlenstoffdioxid in geschlossenen Räumen erfordert den Einbau einer Gaswarnanlage. Die Arbeitsschutzgefährdung wird demnach als „gering“

eingeschätzt. Insgesamt wurde das Gefährdungspotential ausgehend von den Zusatzstoffen als „keine bis gering“ eingeschätzt.

Da die Wasserverluste der CARIX-Anlage über eine höhere Rohwasserförderung ausgeglichen werden müssen, muss die WGA über ein ausreichendes Wasserdargebot (hier rechtlich bewilligte Wasserentnahmemenge) bei Einsatz der Verfahrenstechnik verfügen. Das Verhältnis von Rohwasserentnahme zur wasserrechtlich bewilligten Entnahmemenge im Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld-Maktsteft beträgt beim Einsatz der CARIX-Anlage 83,1 %.

#### 5.4.1.2 Variante 2: Ozonung, Aktivkohle und CARIX

##### **Kurzbeschreibung Ozonung mit anschließender Aktivkohle**

Durch den Einsatz von Ozon bei der Trinkwasseraufbereitung können die anthropogenen organischen Spurenstoffe oxidiert werden. Das heißt, dass insbesondere die langkettigen, schlecht adsorptiv entfernbaren Stoffe chemisch in niedermolekulare, biologisch gut abbaubare Stoffe transformiert werden.

Das Ozon muss am Verwendungsort hergestellt werden und intensiv in das Wasser eingemischt werden. (Fritsch, et al., 2014, S. 325ff)

Dazu wird dem Rohwasser eine Ozonmenge von 2 mg/L bei einer Kontaktzeit von 10 min zudosiert. Diese Konzentrationsmenge und Dauer wurde bereits in der Studie zur „Erweiterung der Aufbereitungsanlage Sulzfeld“ im Jahr 2005 bestimmt. Sie entspricht den Angaben des DVGW Arbeitsblattes W 225.

Das Restozon aus der Abluft der Mischkammern muss entfernt werden, z. B. über Kohlefilter. (Fritsch, et al., 2014, S. 327)

Der weitere Verfahrensablauf entspricht der Variante 1.

Das WW Volkach wird bereits mit einer Ozonung und anschließender Aktivkohlefiltration betrieben. Die Erfahrung zeigt, dass die Filter auch hier nach ca. 2 a regeneriert werden müssen. Demnach wird die Laufzeit der Filter, wie in Variante 1 mit 2 a angenommen.

##### **Quantitative Eckdaten**

Abbildung 23 zeigt die benötigten Wassermengen für die Variante 2: Ozonung, Aktivkohle und CARIX. Das Eigenwasser wird im Vollstrom über die Ozonung und anschließende Aktivkohle gefahren. Vor dem Zulauf zu den Ionenaustauschern wird, wie bei Variante 1, das Fremdwasser zugeleitet. Die Ausbeute der Anlage und das Verhältnis von Abwasseranfall zu Trinkwasserabgabe entsprechen Variante 1.

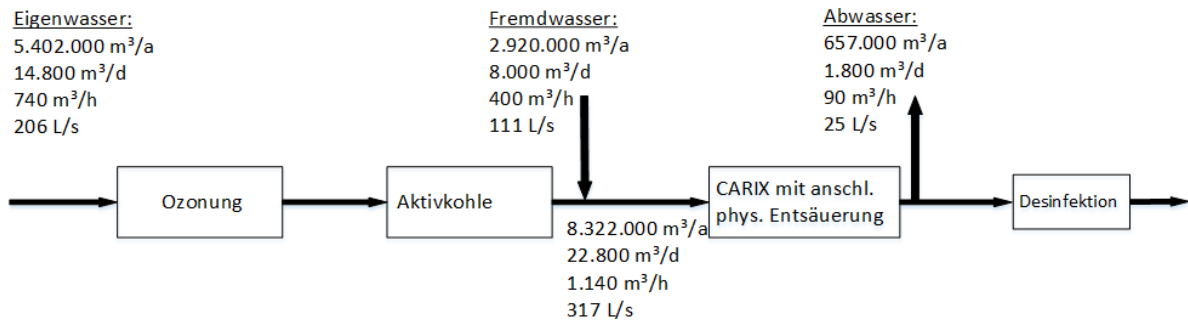


Abbildung 23: Fließschema der Aufbereitungsvariante Ozonung, Aktivkohle und CARIX

### Qualitative Eckdaten

Die chemischen Parameter zur Trinkwasserqualität stimmen mit den Parametern der Variante 1 überein. Die Entfernbarkeit der anthropogenen organischen Spurenstoffe wurde aus der Literatur entnommen (siehe Quellenangaben in Tabelle 21).

Tabelle 21 beinhaltet die Trinkwasserqualität am WW-Ausgang für die Variante 2.

Tabelle 21: Variante 2 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang

Parameter		Einheit	Trinkwasser- qualität am WW- Ausgang	Quelle
Säurekapazität		mmol/L	2,9	(Sauer, 2016, S. 9)
Basenkapazität		mmol/L	0,2	(Sauer, 2016, S. 9)
pH-Wert			7,6	(Sauer, 2016, S. 9)
Gesamthärte		mmol/L	2,3	(Sauer, 2016, S. 9)
Nitrat		mg/L	20	(Sauer, 2016, S. 9)
Chlorid		mg/L	38	(Sauer, 2016, S. 9)
Sulfat		mg/L	64	(Sauer, 2016, S. 9)
Calcitlösekapazität		mg/L	0	(Sauer, 2016, S. 9)
Korrosions- chemischer Quotient S1		[-]	0,9	(Sauer, 2016, S. 10)
Organische Spurenstoff- entfernung	Carbamazepin	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Jekel, 2013, S. 8; Haist- Gulde, 2014, S. 16ff)
	Röntgenkontrastmittel (1: Iopamidol, 2: Amidotrizoesäure)	[-]	1 und 2: keine bis gering	(Haist-Gulde, 2014, S. 21)
	N, N-Dimethylsulfamid	[-]	Hoch bis sehr hoch	(DVGW W 225 (A), 2015, S. 11)
	EDTA	[-]	Mittel	(Haist-Gulde, 2014, S. 21)
	Chloridazon Metabolit B und B1	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Haist-Gulde, 2014, S. 21)

Die Ozonung verbessert, gegenüber der alleinigen Adsorption, die Entfernung der organischen Spurenstoffe. Dennoch führt die Oxidation zur Bildung von Transformationsprodukten. Kritisch ist dies bei DMS, denn Ozon oxidiert das Metabolit des Pflanzenschutzmittels Tolyfluanid zu NDMA einer gentoxischen Substanz, für die das UBA einen GOW von 0,01 µg/L festgelegt hat. Damit dieser Stoff nicht in das Trinkwasser gelangt ist eine gut arbeitende biologische Filterstufe im Anschluss an die Ozonung notwendig. (DVGW W 225 (A), 2015, S. 11)



In Volkach weist das Rohwasser ebenfalls DMS auf, was durch eine Ozonung oxidiert und in der biologisch arbeitenden Aktivkohlefiltration entfernt werden kann.

### **Abwasserzusammensetzung**

Die Abwasserzusammensetzung der Variante 2 ist mit der in Variante 1 identisch. Demnach unterscheiden sich auch nicht die Bedingungen zur Erfüllung der Anforderungen für die Einleitung des Abwassers in den Main.

### **Kostenschätzung**

Die Kostenschätzung für Variante 2 erfolgt auf Basis der Kostenschätzung der FWF-Vorstudie für Variante 1 (Sauer, 2016, S. 13f). Die Kostenschätzung für Variante 2 unterscheidet sich von Variante 1 bei den „variablen Betriebskosten“ nur in dem Unterpunkt „Energiebedarf Aufbereitung“ und bei den „Fixkosten“ in den Unterpunkten „Investitionskosten Ozonanlage“ und „Abschreibung Verfahrenstechnik“.

Die Energiekosten der Ozonanlage wurden mithilfe der Studie „Erweiterung der Aufbereitungsanlage Sulzfeld“ (2005) ermittelt. Für eine Pilotanlage wurde die Leistung für 100 L/s mit 25 kW angegeben. Bei den durchschnittlich benötigten 200 L/s wird hier eine Leistung von 50 kW angenommen, bei einer Laufzeit von 20 h pro Tag und 23 d pro Monat.

$$\text{Energiekosten (Ozonung)} = 50 \text{ kW} \cdot 23 \frac{\text{d}}{\text{Monat}} \cdot 20 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 12 \frac{\text{Monate}}{\text{a}} \cdot 0,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 44.200 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (9)$$

Die Investitionskosten der Anlage betragen 600.000 €. Dieser Wert beruht auf zwei Annahmen:

- 1) In der Studie „Erweiterung der Aufbereitungsanlage Sulzfeld“ (2005) wurden die Investitionskosten mit 800.000 € für 385 L/s angenommen. Die hier dimensionierte Anlage muss nur maximal 295 L/s aufbereiten können (bei maximalem Tagesbedarf). Die Investitionskosten können somit mit 600.000 € angenommen werden. (INSUMMA - SHP - Pfenning, 2005, S. Anhang)
- 2) Das „Taschenbuch der Wasserversorgung“ (2014) gibt für die verfahrenstechnische Ausrüstung einer Ozonanlagen Kosten zwischen 180.000 € (für 100 L/s) und 800.000 € (für 500 L/s) an. Mithilfe linearer Interpolation würden sich die Kosten der hier dimensionierten Anlage auf 500.000 € belaufen. Da die Studie in Annahme 1 für eine technische Aufbereitungskapazität von rund 400 L/s 800.000 € Investitionskosten veranschlagt hat, die die Angaben im „Taschenbuch der Wasserversorgung“ um 100.000 € überschreiten, werden auch hier 100.000 € mehr angenommen. Damit ergeben sich ebenfalls 600.000 €. (Fritsch, et al., 2014, S. 820)

Die Kostenschätzung für „Variante 2: Ozonanlage, Aktivkohle und CARIX“ ergibt folgende Werte:

Tabelle 22: Variante 2 - Kostenschätzung

Variable Betriebskosten	€/a	776.000
	Cent/m <sup>3</sup>	10,12
Fixkosten	€/a	977.000
	Cent/m <sup>3</sup>	12,74

### **Weitere Informationen**

Die Kohlenstoffdioxid-Emission ist aufgrund der vorgeschalteten Ozonung höher, als bei Variante 1 und geringer als bei Variante 3. Somit konnte ein gemittelter Wert von 181 g CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> angenommen werden. Der Raumbedarf ist höher als bei Variante 1, aufgrund des hinzukommenden Ozongenerators und wird als „sehr hoch“ bewertet.

Beim CARIX-Verfahren in Kombination mit Ozonung und Aktivkohle werden Kohlenstoffdioxid und Ozon als Zusatzstoffe benötigt. Das Ozon wird in einem Ozongenerator vor Ort hergestellt. Ozon ist stark giftig und am Arbeitsplatz dürfen maximal 0,2 mg/m<sup>3</sup> in der Luft vorhanden sein. Der Umgang mit Ozon bedingt die Einhaltung der Unfallverhütungsvorschriften und eine Vielzahl an betrieblichen und räumlichen Anweisungen die einzuhalten sind (siehe ZH 1/474). Das Gefährdungspotential ausgehend von Kohlenstoffdioxid wurde in Abschnitt 5.4.1.1 bereits erläutert. Da beim Einsatz von Ozon und Kohlenstoffdioxid von einer Arbeitsschutzgefährdung ausgegangen werden kann, aber keine Gefahr für die Umwelt besteht, wird das Gefährdungspotential ausgehend von den eingesetzten Zusatzstoffen als „mittel“ eingeschätzt. (Fritsch, et al., 2014, S. 325)

Das Verhältnis von Rohwasserentnahme zur wasserrechtlich bewilligten Entnahmemenge entspricht Variante 1.

Im Jahr 2005 wurde die Ozonung bereits in der Studie zur Erweiterung der Aufbereitungsanlage im WW Sulzfeld als Variante betrachtet. Damals wurde die Überschreitung des Bromat-Grenzwertes bei Einsatz des Verfahrens als sehr wahrscheinlich erachtet, weshalb man sich von dem Verfahren distanzierte. Durch eine Oxidation von Bromid zu Bromat könnte der Grenzwert der TrinkwV 2001 von 10 µg/L überschritten werden. Weiterhin können die Zwischenprodukte der Bromatbildung mit im Wasser vorhandenen organischen Stoffen bromhaltige Trihalogenmethane (THM) bilden, die an der Zapfstelle den Grenzwert von 50 µg/L nicht überschreiten dürfen (DVGW W 225 (A), 2015, S. 10). Die aktuellen Rohwasseranalysen weisen Bromidkonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze auf, weiterhin sind die DOC-Werte sehr gering, sodass eine THM-Bildung ausgeschlossen werden kann. Somit ist eine mögliche Bromatbildung sehr unwahrscheinlich und die Betrachtung der Ozonung in Kombination mit Aktivkohle und einer CARIX-Anlage als eine Variante berechtigt.

### 5.4.2 Membranverfahren – Varianten 3 und 4

#### Kurzbeschreibung – Prinzip der Membranverfahren

Das Prinzip der Membranverfahren, Niederdruckumkehrosmose (LPRO: Low Pressure Reverse Osmosis) und Nanofiltration (NF), ist gleich. Ein Rohwasservolumenstrom wird mittels einer Hochdruckpumpe in die Membranmodule gedrückt und überströmt die Membranoberfläche. Dabei durchdringt ein Teil des Wassers die Membran und verlässt diese als Permeat. (DVGW, 2009, S. 6f)

Das Verfahrensprinzip wird „Cross-Flow-Modus“ genannt, bei dem ein kontinuierlicher Abströmprozess auf der Feedseite aufrecht gehalten wird (siehe Abbildung 24 (DVGW, 2009, S. 7)). Dort reichern sich auch die verbleibenden Wasserinhaltsstoffe an und bilden das so genannte Konzentrat. (Greger, 2009, S. 10f)

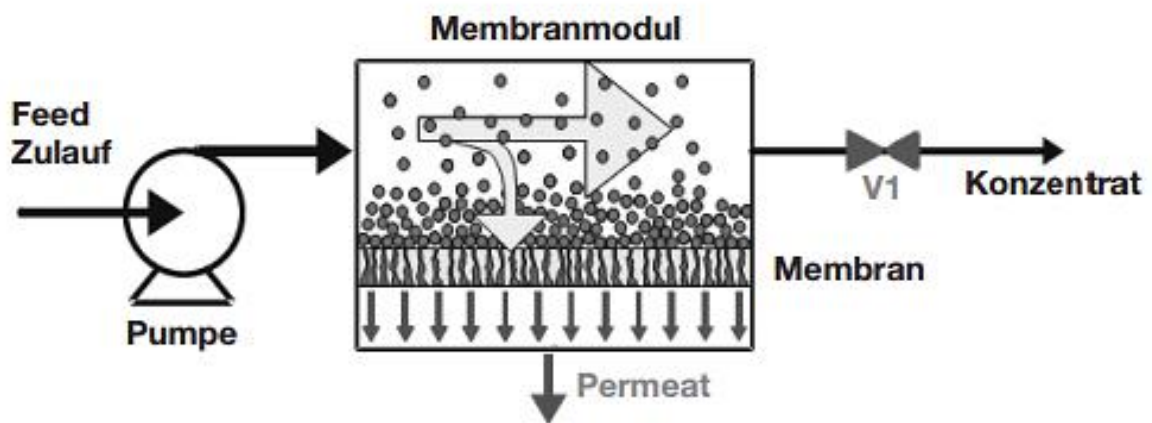


Abbildung 24: Verfahrensprinzip "Cross-Flow" der Membranverfahren LPRO und NF

Die treibende Kraft bei der Membranfiltration ist die Druckdifferenz. Der Rückhalt der Membranen variiert nach ihrer Porengröße und –verteilung. Die dichteste Membran ist die UO-Membran, mit einem mittleren Durchmesser von 0,3 bis 1 nm, gefolgt von der NF-Membran (0,8 bis 10 nm). Membranverfahren bewirken sowohl eine Enthärtung, (Teil-) Entsalzung und (teilweise) organische Spurenstoffentfernung. Sie wirken nicht selektiv. (DVGW, 2009, S. 5f; Fritsch, et al., 2014, S. 319)

Die Ausbeute (das Verhältnis zwischen Permeat und Feed) der Membrananlage bestimmt im Wesentlichen den Rohwasserbedarf, aber auch den Grad der Aufkonzentrierung im Konzentrat. Um die Ausbeute möglichst hoch zu halten, werden die Module normalerweise parallel und hintereinander geschaltet. Die häufig eingesetzte „Tannenbaumstruktur“ erhöht die Ausbeute der Anlage, fördert aber auch das Scaling-Risiko (siehe Abbildung 25 (Greger, 2009, S. 26)). (DVGW, 2009, S. 7)

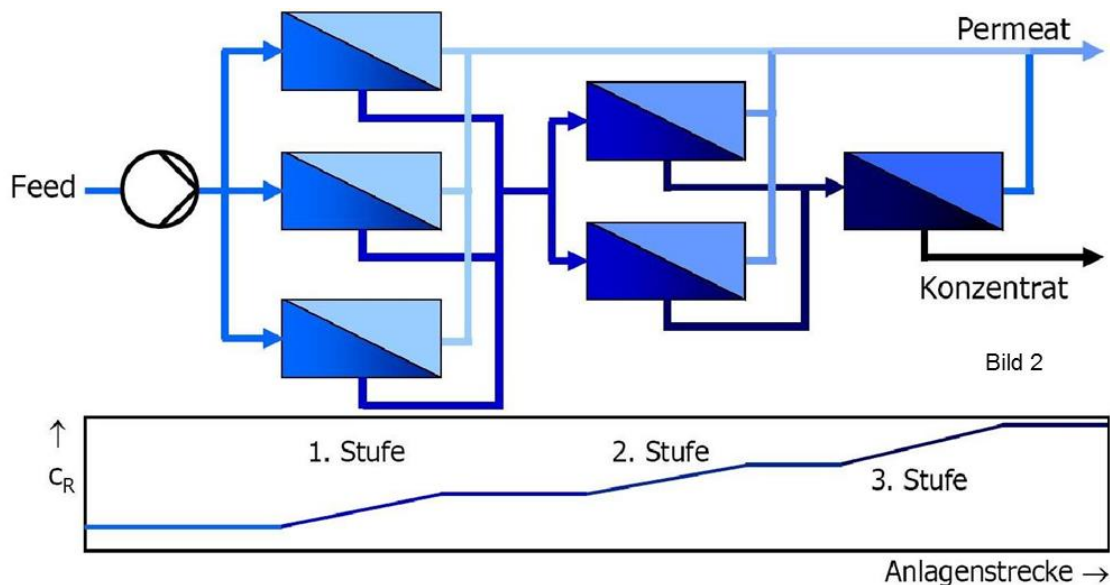


Abbildung 25: Tannenbaumstruktur einer Membrananlage

Als „Scaling“ werden Ausfällungen in Folge des Überschreitens des Löslichkeitsproduktes anorganischer Verbindungen bezeichnet, die die Durchlässigkeit der Membran beeinträchtigen können. Zur Vorbeugung werden dem Rohwasser so genannte Antiscalants und ggf. eine Säure zur Absenkung des pH-Wertes zugegeben. (Greger, 2009, S. 26f) In der Trinkwasserversorgung eingesetzte Antiscalants müssen in der Liste der zugelassenen Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren gemäß § 11 TrinkwV 2001 aufgelistet sein. Deshalb kommt nur ein Einsatz der Wirkstoffe Polyphosphat, Phosphonsäure und Polyacrylsäure in Betracht. Antiscalants, die Phosphate enthalten, können zur Eutrophierung der Gewässer führen. Alternative Antiscalants ohne Phosphatanteil sind weniger effizient in ihrer Wirkung oder können zu neuen Problemen führen, wie Biofouling. (Müller, 2015, S. 79; Greger, 2016a; Groß, Raue, Shi, & Müller, 2011, S. 4f) Für das WW Sulzfeld ist eine Antiscalantdosierung mit dem Wirkstoff Phosphonsäure vorgesehen.

Die NF/LPRO-Anlagen werden erst seit 2002 vermehrt gebaut, auch wenn es bereits 1982 die erste großtechnische UO-Anlage gab. Zum jetzigen Zeitpunkt weisen 50 % der Anlagen eine Anlagenkapazität unter 45 m³/h auf. Die größte NF-/UO-Anlage befindet sich in Nordrhein-Westfalen mit einer Anlagenkapazität von 1000 m³/h. (Müller, Baldauf, Osmera, & Götsche, 2009, S. 10ff) Die benötigte Anlagenkapazität des WW Sulzfeld würde sowohl für NF als auch für LPRO unter 600 m³/h liegen.

#### 5.4.2.1 Variante 3: Nanofiltration (NF)

Die NF kann Stoffe oberhalb einer Molekülgröße von 200 g/mol entfernen bei einer transmembranen Druckdifferenz zwischen 3 und 10 bar. Das Verfahren wird in der Trinkwasseraufbereitung überwiegend zur Enthärtung und Teilentsalzung eingesetzt, da bevorzugt mehrwertige Ionen abgeschieden werden. Einwertige Ionen, wie Nitrat,

Hydrogencarbonat und Chlorid verbleiben größtenteils im Permeat. Die NF ermöglicht auch eine organische Spurenstoffentfernung. (Technische Universität Berlin, 2004, S. 247; Fritsch, et al., 2014, S. 319)

Da das Verfahren der NF sehr empfindlich gegenüber Trübstoffen im Rohwasser ist, wird das Rohwasser zur Vorbehandlung über so genannte Kerzenfilter geleitet. Im Anschluss wird dem Wasser ein Antiscalant zu dosiert, dass die Ausfällung insbesondere von Sulfatverbindungen verhindert. (DVGW, 2009, S. 7)

Im Anschluss an die Membranfiltration muss das Permeat aufgrund der fehlenden Härtebildner auf die gewünschte Härte eingestellt werden. Dies erfolgt durch den unbehandelten Teilstrom der mit dem Permeat vermischt wird. Anschließend wird die überschüssige Kohlensäure des calcitlösenden Wassers mittels einer physikalischen Entsäuerung entfernt.

### Quantitative Eckdaten

Abbildung 26 zeigt die benötigten Wassermengen für die Variante 3: Nanofiltration. Das Eigenwasser wird im Hauptstrom über die Membrananlage und im Teilstrom über die Aktivkohle geleitet, im Verhältnis 70:30. Im Anschluss wird das Permeat mit dem Teilstrom vermischt und entsäuert. Die Fremdwasserezuleitung erfolgt erst nach der Entsäuerung. Die Ausbeute der NF-Anlage wird mit 80 % angenommen. Das Verhältnis von Abwasseranfall zu Trinkwasserabgabe beträgt 10,5 %.

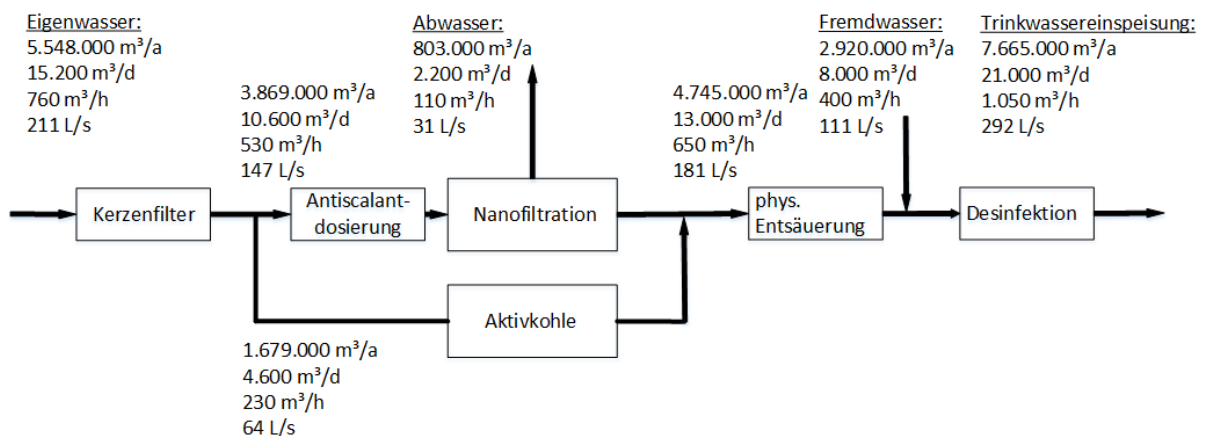


Abbildung 26: Fließschema der Aufbereitungsvariante Nanofiltration

### Qualitative Eckdaten

Zur Berechnung der Trinkwasserqualität am WW-Ausgang wurden folgende Konzentrationswerte des Permeats angenommen:

- Nitrat: 31 mg/L (nur geringfügige Entfernung)
- Chlorid: 52 mg/L (nur geringfügige Entfernung)
- Sulfat: 27 mg/L (Annahme Permeat-Konzentrationswerte wie in Variante 4)
- Calcium: 16 mg/L (Annahme Permeat-Konzentrationswerte wie in Variante 4)
- Magnesium: 6 mg/L (Annahme Permeat-Konzentrationswerte wie in Variante 4)
- Härte: 0,64 mmol/L (3,6 °dH) (Annahme Permeat-Konzentrationswerte wie in Variante 4)

Da die Qualität des Fremdwassers und des Teilstroms bekannt sind, kann die Trinkwasserqualität am WW-Ausgang über die Mischungsverhältnisse berechnet werden. Die Ergebnisse können der nachfolgenden Tabelle 23 entnommen werden.

Tabelle 23: Variante 3 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang

Parameter		Einheit	Trinkwasser- qualität am WW-Ausgang	Quelle
Gesamthärte		mmol/L	2,3	
Nitrat		mg/L	22,6	
Chlorid		mg/L	41,6	
Sulfat		mg/L	64,7	
Organische Spurenstoff- entfernung	Carbamazepin	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Haist-Gulde, 2014, S. 17)
	Röntgenkontrastmittel (1: Iopamidol, 2: Amidotrizoesäure)	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Pinnekamp & Bolle, 2011, S. 62)
	N, N-Dimethylsulfamid	[-]	Mittel	(Brauch, 2008, S. 3; Brauch, 2009, S. 64)
	EDTA	[-]	Hoch	(Berg, 2002, S. 89f)
	Chloridazon Metabolit B und B1	[-]	Gering	(Haist-Gulde, 2014, S. 17)

Viele anthropogene organische Spurenstoffe können durch die NF entfernt werden, eine Ausnahme bildet Benzotriazol, das nicht durch die NF entfernbar ist. Weitere Stoffe wie Desethyldeisopropylatrazin werden nur zu kleiner 10 % entfernt. (Haist-Gulde, 2014, S. 17)

### **Abwasserzusammensetzung**

Das Abwasser der Nanofiltration wird auch Konzentrat genannt. Es enthält die aufkonzentrierten entfernten Stoffe und das Antiscalant, welches in das Rohwasser dosiert wird. Als Antiscalant wird eine Phosphonsäure verwendet, die 0,2 mg P/L enthält und im Konzentrat zu 0,96 mg P/L aufkonzentriert wird.

Die Nanofiltration hält die Einleitwerte für Abwasserbehandlungsanlagen gemäß Abwasserverordnung für Stickstoff (< 18 mg/L) und Phosphor (< 2 mg/L) ein.

Tabelle 24: Variante 3 - Abwasserzusammensetzung

<b>Permeat</b>	<b>m³/d</b>	<b>8.500</b>		
<b>Feed</b>	<b>m³/d</b>	<b>10.600</b>		
<b>Konzentrat</b>	<b>m³/d</b>	<b>2.200</b>		
		<b>Feed</b>	<b>Permeat</b>	<b>Konzentrat</b>
Nitrat	mg/L	37	30	61
M=62,0004 g/mol	kg/d	392	258	134
<b>Stickstoff</b>	<b>mg/L</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>14</b>
M=14,007 g/mol	<b>kg/d</b>	89	58	<b>30</b>
Phosphat	mg/L	0	0	3
M=94,97 g/mol	kg/d	0	0	7
<b>Phosphor</b>	<b>mg/L</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
M=30,974 g/mol	<b>kg/d</b>	0	0	<b>2</b>

Neben dem Konzentrat ist noch das Abwasser der chemischen Membranreinigung (CIP) einzuplanen. Die CIP ist zur Wartung der Membran notwendig. Die Mehrheit der bisher in Deutschland installierten Membrananlagen wird zweimal jährlich gereinigt. (Müller, Baldauf, Osmera, & Götsche, 2009, S. 38) Die Reinigungslösung wird in einem separaten Sammelbehälter aufgefangen und auf den pH-Wert 7 neutralisiert. Durch die hohen CSB-Fachten ist eine Einleitung in das Gewässer nicht möglich. Mithilfe eines Tanklasters muss das Abwasser zu einer nahegelegenen Abwasserbehandlungsanlage transportiert werden. (Greger, 2016a)

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für Variante 3 setzt sich aus den „variablen Betriebskosten“, untergliedert in „Energiebedarf Brunnenpumpen“, „Energiebedarf Aufbereitung“ und „Antiscalant“ und den „Fixkosten Betrieb“ untergliedert in „Membranersatzkosten“, „Kerzenfilter“, „Aktivkohle“, „Abwasserabgabe“ und „CIP“ zusammen. Die Kostenpunkte für die „Fixkosten Investition und Abschreibung“ entsprechen denen in Variante 1.

Die Kostenschätzung für Variante 3 erfolgt auf Basis der Kostenschätzung der FWF-Vorstudie für Variante 4 (Sauer, 2016, S. 13f).

Der Betriebskosten „Energiebedarf der Brunnenpumpen“ konnte durch lineare Interpolation zwischen den Energiekosten der Varianten 1 und 4 ermittelt werden.

Für die Betriebskosten „Energiebedarf der Aufbereitung“ wurden 0,35 kWh/m³ angenommen. Dieser Wert liegt nur geringfügig über dem Durchschnitt der NF/LPRO-Anlagen in Deutschland (0,32 kWh/m³). (Müller, Baldauf, Osmera, & Götsche, 2009, S. 25)

Die Antiscalantdosierung wurde der Variante 4 gleichgesetzt. Die Flächenbelastung wurde mit 30 L/m²/h angenommen entsprechend den Angaben im „Taschenbuch der Wasserversorgung“ (Fritsch, et al., 2014, S. 318).

Alle weiteren Annahmen wurden der Variante 4 gleichgesetzt und stammen aus den Angaben der Vorstudie (Sauer, 2016).

Die Kostenschätzung für Variante 3: Nanofiltration ergibt folgende Werte:

Tabelle 25: Variante 3 - Kostenschätzung

Variable Betriebskosten	€/a	784.000
	Cent/m <sup>3</sup>	10,22
Fixkosten	€/a	782.000
	Cent/m <sup>3</sup>	10,20
Fixkosten ohne AK	Cent/m <sup>3</sup>	9,24

### **Weitere Informationen**

In der hier vorliegenden Arbeit werden 30 % des Eigenwassers nicht über die NF-Anlage geleitet, sondern zur Aufhärtung des Permeats dem Hauptstrom vor der Entsäuerung zugespeist. Der Teilstrom wird einer Aktivkohleanlage zugeführt. Ob die Aktivkohlefiltration tatsächlich notwendig ist oder der Verdünnungseffekt auch im stärksten Belastungsfall zukünftig ausreichen würde, ist aktuell schwer abzuschätzen. Dies ist abhängig von der zukünftigen Entwicklung der organischen Spurenstoffkonzentrationen im Rohwasser. Für die NF ist eine Aktivkohlefiltration in jedem Fall anzuraten, da diese bestimmte anthropogene organische Spurenstoffe nicht vollständig oder gar nicht entfernt, wie Chloridazon-Metabolit B (sehr schlechte Entfernung nur bis zu 15 %). Die FWF als Wasserversorger muss hier ihre Vorsorgepflicht wahrnehmen.

Weiterhin gibt es in Deutschland keinen Hersteller echter NF-Anlagen der eine KTW-Zulassung besitzt oder über eine Prüfung nach DVGW W 270 verfügt. Entsprechend § 17 TrinkwV 2001 gibt das UBA eine verbindliche Bewertungsgrundlage vor, die Anforderungen an Materialien und Werkstoffe stellt, die in Kontakt mit Trinkwasser kommen. Dennoch finden diese Anlagen häufig Anwendung. Begründet wird dies mit dem fehlenden Wettbewerb auf dem deutschen Markt, da bisher nur der Hersteller TORAY über eine KTW-Zulassung für LPRO-Anlagen verfügt und damit eine Monopolstellung auf dem deutschen Markt hat. Zum anderen verfügen einige Hersteller über Zulassungen von NF-Membranen auf ausländischen Märkten, auf denen sie ebenfalls harte Kriterien erfüllen müssen. Vielen Herstellern ist die Zulassung für den deutschen Nischenmarkt zu aufwändig oder sie wollen ihre Herstellungsinterna nicht preisgeben. Die KTW-Leitlinie wird in Deutschland jedoch als Stand der Wissenschaft und Technik angesehen. Die Zulassung versichert, dass die eingesetzten Materialien die hygienischen Anforderungen im Kontakt mit Wasser für den menschlichen Gebrauch erfüllen. Da die KTW-Leitlinie keine Rechtsnorm darstellt, können NF-Anlagen dennoch verwendet werden. (Sauer, 2016, S. 6f; Greger, 2016b)

Bislang existiert für Membrananlagen kein DVGW Arbeitsblatt. Ein im April 2014 veröffentlichter Gelbdruck des Arbeitsblattes W 236 wurde bis auf weiteres zurückgestellt.



Begründet wird dies mit noch bestehenden Wissenslücken, die im Zusammenhang mit der Überwachung der Intaktheit der Membranen und dem damit zusammenhängenden Rückhalt der Antiscalants bestehen. Es wird vermutet, dass die Methode der Leitfähigkeitsmessung im Sammelermeat nicht ausreichend ist, um Defekt-Volumenströme zu detektieren. Derzeit forscht der IWW im Rahmen des DVGW geförderten Forschungsvorhabens W 4-01-14 an der „Entwicklung eines erweiterten Monitoringkonzeptes zur Überwachung der Wasserqualität von RO/NF-Anlagen“. Damit gibt es noch kein geeignetes Monitoringverfahren zur Messung der Membrandurchlässigkeit. (Dördelmann, Panglisch, & Stetter, 2015)

Im IWW Journal Ausgabe 44 (Mai 2016) veröffentlicht der IWW erstmals Ergebnisse aus dem DVGW-Forschungsvorhaben. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Es muss eine Detektion kleiner Defekt-Volumenströme möglich sein, um die Membranen überwachen zu können.
- Dazu eignen sich vor allem Stoffe für die die Membran einen sehr guten Rückhalt gewährt.
- Die Überwachungsparameter sollten möglichst nah an der Membrananlage überwacht werden und nicht erst im Sammelermeat, um eine höhere Empfindlichkeit sicherzustellen. Hierbei wird empfohlen die einzelnen Druckrohre zu überprüfen.
- Da „offene“ NF-Membranen geringere Salzkonzentrationen zurückhalten, kann man mit einfachen Leitfähigkeitsmessungen selbst im Permeat der einzelnen Druckrohre nur größere Defekt-Volumenströme bestimmen.

Da es bisher noch keine praktischen Erfahrungen zu den empfohlenen Methoden gibt, rät der IWW im Rahmen von Pilotversuchen ein Folgeprojekt zu initialisieren. (Stetter & Dördelmann, 2016, S. 6)

Sollte zur Überwachung der Membrananlagen zukünftig eine Leitfähigkeitsmessung der einzelnen Druckrohre nötig sein, so würde die hier veranschlagte Kostenschätzung weit überschritten werden.

Die Kohlenstoffdioxid-Emission der NF beträgt 270 g CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> (Sauer, 2016, S. 8). Der Raumbedarf der NF-Anlage ist aufgrund der Aktivkohle-Anlage mit „mittel“ zu bewerten.

Die NF benötigt ein Antiscalant als Zusatzstoff und weitere Chemikalien für die zweimal jährlich durchzuführende chemische Membranreinigung. Da das Antiscalant einen nicht unerheblichen Anteil an Phosphat im Konzentrat verursacht, welches in den Main eingeleitet wird, bei erfolgter Genehmigung, ist von einer potentiellen Gefährdung für die Umwelt auszugehen. Phosphate fördern die Euthrophierung der Gewässer. Die Membranablagerungen bestimmen die Art der Chemikalien bei der chemischen Reinigung. In der Regel finden erwärmte Chemikalien, wie alkalische oder saure Tenside

ihren Einsatz (Sauer, 2016, S. 5; DVGW, 2009, S. 8) Der Umgang mit den Chemikalien begründet eine potentielle Arbeitsschutzgefährdung. Daher wird das Gefährdungspotential ausgehend von den eingesetzten Zusatzstoffen als „sehr hoch“ eingeschätzt.

Das Verhältnis von Rohwasserentnahme zur wasserrechtlich bewilligten Entnahmemenge beträgt beim Einsatz der NF-Anlage 85,4 %.

#### 5.4.2.2 Variante 4: Niederdruckumkehrosmose (LPRO)

Der Betriebsdruck der Niederdruckumkehrosmoseanlage (LPRO) liegt zwischen 10 und 15 bar. Das Verfahren der LPRO wird in der Trinkwasseraufbereitung überwiegend zur Enthärtung und Entsalzung (hier vorwiegend die Nitrat- und Sulfatentfernung) eingesetzt. Die Membranen ermöglichen die Entfernung einwertiger und zweiwertiger Ionen, sowie gelöster organischer und niedermolekularer organischer Wasserinhaltsstoffe. Gelöste Gase können die Membran passieren. (Fritsch, et al., 2014, S. 319)

Wie bei der NF auch muss das Eigenwasser mittels Kerzenfilter vorbehandelt werden, um Trübstoffe im Rohwasser zu vermeiden. Als Antiscalant wird ebenfalls Phosphonsäure eingesetzt, die Ausfällungen auf der Membranoberfläche verhindern soll. Da die gelösten Gase, wie Kohlenstoffdioxid auch nach Passage der Membran im Wasser verbleiben, muss es in einer nachgeschalteten Entsäuerung entfernt werden.

Die Aufhärtung des Wassers wird durch eine Mischung mit einem nichtbehandelten Teilstrom erreicht.

#### **Quantitative Eckdaten**

Abbildung 27 zeigt die benötigten Wassermengen für die Variante 4: Niederdruckumkehrosmose. Der Hauptstrom des Eigenwassers wird über die Membrananlage und ein Teilstrom über eine Aktivkohlefiltration geleitet, im Verhältnis 70:30. Das Permeat wird im Anschluss mit dem Teilstrom vermischt und entsäuert. Erst danach erfolgt die Zuleitung des Fremdwassers. Die Ausbeute der LPRO-Anlage wird mit 75 % angenommen. Das Verhältnis von Abwasseranfall zu Trinkwasserabgabe beträgt 13,3 %.

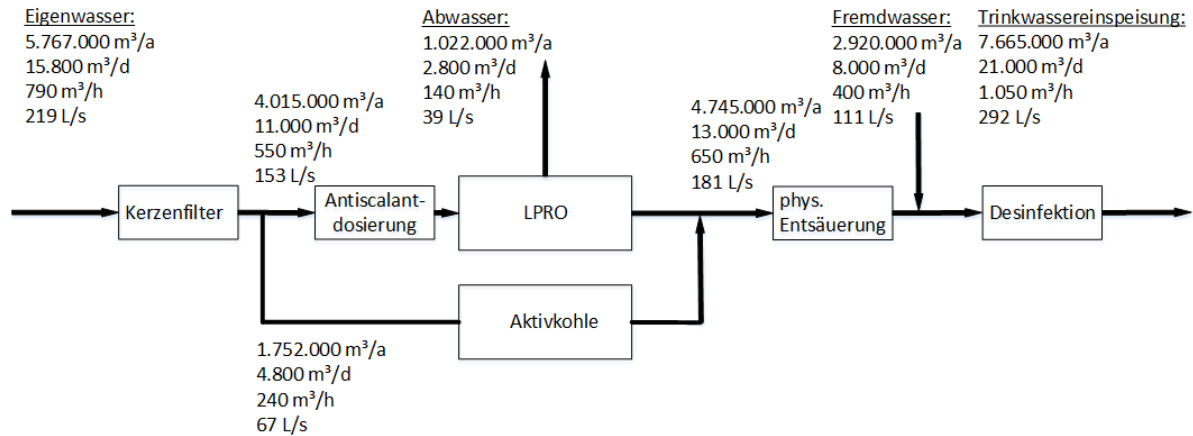


Abbildung 27: Fließschema der Aufbereitungsvariante Niederdruckumkehrosmose

### Qualitative Eckdaten

Die Qualitätsparameter für das Trinkwasser am WW-Ausgang sind in Tabelle 26 dargestellt. Diese beinhaltet auch die Angabe der Quellen.

Tabelle 26: Variante 4 - Erwartete Trinkwasserqualität am WW-Ausgang

Parameter		Einheit	Trinkwasser- qualität am WW- Ausgang	Quelle
Säurekapazität		mmol/L	3,0	(Sauer, 2016, S. 9)
Basenkapazität		mmol/L	0,2	(Sauer, 2016, S. 9)
pH-Wert			7,6	(Sauer, 2016, S. 9)
Gesamthärte		mmol/L	2,3	(Sauer, 2016, S. 9)
Nitrat		mg/L	12	(Sauer, 2016, S. 9)
Chlorid		mg/L	23	(Sauer, 2016, S. 9)
Sulfat		mg/L	65	(Sauer, 2016, S. 9)
Calcitlösekapazität		mg/L	0	(Sauer, 2016, S. 9)
Korrosions- chemischer Quotient S1		[-]	0,74	(Sauer, 2016, S. 10)
Organische Spurenstoff- entfernung	Carbamazepin	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Haist-Gulde, 2014, S. 17)
	Röntgenkontrastmittel (1: Iopamidol, 2: Amidotrizoesäure)	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Pinnekamp & Bolle, 2011, S. 62)
	N, N-Dimethylsulfamid	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Bethmann, Müller, & Baldauf, 2012, S. 4)
	EDTA	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Bethmann, Müller, & Baldauf, 2012, S. 4)
	Chloridazon Metabolit B und B1	[-]	Hoch bis sehr hoch	(Haist-Gulde, 2014, S. 17)

Die LPRO-Anlage entfernt fast alle anthropogenen organischen Spurenstoffe zu mindestens 50 %. Eine Ausnahme bildet Benzotriazol, das nur zu ca. 35 % entfernt wird, im Rohwasser der WGA Sulzfeld-Marktsteft, aber keine Rolle spielt. (Haist-Gulde, 2014, S. 17)

### Abwasserzusammensetzung

Das Konzentrat der LPRO-Anlage enthält, wie das Konzentrat der NF-Anlage, die aufkonzentrierten entfernten Stoffe und das Antiscalant. Letzteres enthält 0,2 mg P/L, dass im Konzentrat zu 0,79 mg P/L aufkonzentriert wird.

Die Niederdruckumkehrosmose hält die Einleitwerte für Abwasserbehandlungsanlagen gemäß Abwasserverordnung für Phosphor (< 2 mg/L) ein, jedoch nicht für Stickstoff (< 18 mg/L).

Tabelle 27: Variante 4 - Abwasserzusammensetzung

<b>Permeat</b>	<b>m³/d</b>	<b>8.200</b>		
<b>Feed</b>	<b>m³/d</b>	<b>11.000</b>		
<b>Konzentrat</b>	<b>m³/d</b>	<b>2.800</b>		
		<b>Feed</b>	<b>Permeat</b>	<b>Konzentrat</b>
Nitrat	mg/L	37	7,5	123
M = 62,0004 g/mol	kg/d	407	61,5	345,5
<b>Stickstoff</b>	<b>mg/L</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>28</b>
M = 14,007 g/mol	<b>kg/d</b>	<b>92</b>	<b>14</b>	<b>78</b>
Phosphat	mg/L	0	0	2,41
M = 94,97 g/mol	kg/d	0	0	6,75
<b>Phosphor</b>	<b>mg/L</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,79</b>
M = 30,974 g/mol	<b>kg/d</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,2</b>

Auch für die LPRO-Anlage ist eine chemische Membranreinigung einzuplanen. Die Häufigkeit der Reinigung kann durch ein regelmäßiges Überströmen der Membran mit Permeat, welches leicht sauer ist, verringert werden. (Greger, 2016a; Fritsch, et al., 2014, S. 321)

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für Variante 4 erfolgt mit Hilfe der Ausgangsdaten der FWF-Vorstudie (Sauer, 2016, S. 13f).

Zu den „variablen Betriebskosten“ zählen die Energiekosten für die Brunnenpumpen und die Aufbereitungsanlage, sowie der Antiscalant-Bedarf. Die „Fixkosten Betrieb“ untergliedern sich in die Kosten für den Membranersatz, die Kerzenfilter, die Aktivkohle im Teilstrom, die Abwasserabgabe und die chemische Membranreinigung. Die Kostenpunkte für die „Fixkosten Investition und Abschreibung“ entsprechen denen in Variante 1.

Die Kostenschätzung für Variante 4: Niederdruckumkehrosmose ergibt folgende Werte:

Tabelle 28: Variante 4 - Kostenschätzung

Variable Betriebskosten	€/a	871.000
	Cent/m³	11,37
Fixkosten	€/a	834.000
	Cent/m³	10,88
Fixkosten ohne AK	Cent/m³	9,88

## Weitere Informationen

In der hier vorliegenden Arbeit werden 30 % des Eigenwassers zur Aufhärtung des Permeats am Hauptstrom vorbeigeleitet. Der Teilstrom wird lediglich über eine Aktivkohleanlage zur Spurenstoffentfernung geleitet. Da die LPRO über 90 % der Spurenstoffe entfernt, bleibt zu überprüfen, ob der Verdünnungseffekt auch in der größten Belastungssituation ausreicht. Wenn das Überschreiten aller GOW und Grenzwerte mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann, kann auf eine Aktivkohlefiltration verzichtet werden. Solang gilt der Vorsorgegrundsatz, der den Einbau einer Aktivkohlefiltration begründet.

In Deutschland gibt es einen Hersteller, TORAY, der eine KTW-Zulassung für LPRO-Anlagen besitzt. (Greger, 2016a; Sauer, 2015, S. 37)

Die Probleme der LPRO-Anlagen bzgl. des fehlenden DVGW-Regelwerks und des Monitoringkonzeptes wurden bereits in „weitere Informationen“ des Abschnitts „Variante 3: Nanofiltration (NF)“ genannt. Auch die Kostenschätzung der Variante 4 enthält keine Leitfähigkeitsmessung der einzelnen Druckrohre.

Ein weiteres Problem der Membrananlagen, insbesondere der LPRO-Anlagen, stellen die Konzentratleitungen zum Vorfluter dar. Sobald die Wirkung des Antiscalants nachlässt und Kohlenstoffdioxid ausgast, verändert sich die Calcitlösekapazität und die im Konzentrat enthaltenen Härtebildner fallen aus (siehe Abbildung 28 (Fricke, 2012, S. 29f)). Durchschnittlich muss alle fünf Jahre mit einer Erneuerung der Konzentratleitung gerechnet werden. Eine Anpassung der Antiscalantdosierung an die Konzentratleitung kann eine Ausfällung dämpfen. (Greger, 2016a)

Die Abwasserleitung vom WW Sulzfeld (GGG 800) zum Vorfluter ist 585 m lang. Die Kosten einer Erneuerung wurden nicht in der Kostenschätzung berücksichtigt.



Abbildung 28: Konzentratleitung (links) (L=150 m, DN=150 m) und Konzentratauslauf (rechts) nach LPRO-Membrananlage

Die Kohlenstoffdioxid-Emission der LPRO beträgt 303 g CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> (Sauer, 2016, S. 8). Der Raumbedarf der LPRO-Anlage ist aufgrund der Aktivkohle-Anlage im Teilstrom mit „mittel“ zu bewerten.

Das Gefährdungspotential ausgehend von den einzusetzenden Zusatzstoffen ist, wie in Variante 3, als „sehr hoch“ zu bewerten.

Das Verhältnis von Rohwasserentnahme zur wasserrechtlich bewilligten Entnahmemenge entspricht beim Einsatz der LPRO-Anlage 88,7 %.

## **5.5 Bewertung**

### **5.5.1 Aufstellung des Zielsystems (Definition der Ziele und Kriterien)**

Aus der Problemanalyse heraus lassen sich Hauptziele formulieren. Sie spiegeln die Grundinteressen des Entscheidungsträgers wider und stellen die Grundlage für die Nutzwertanalyse dar. Zur Erreichung der Hauptziele müssen verschiedene Unterziele erfüllt werden. Der Erfüllungsgrad der Unterziele wird über Kriterien gemessen, die die unterste Ebene des Bewertungssystems einnehmen.

Der Ziel- und Kriterienkatalog ist die Basis der Nutzwertanalyse und kann das spätere Ergebnis maßgebend entscheiden. Daher ist dieser im Dialog mit den Entscheidungsträgern, also der Werkleitung der FWF entstanden, um die Interessen des Unternehmens zu wahren.

Der Schlussbericht des BMBF/DVGW – Forschungsvorhabens „Technisch-ökologische und ökonomische Evaluierung alternativer Wasseraufbereitungsverfahren an den Beispielen Arsenelimination und zentrale Trinkwasserenthärtung“ liefert eine Einführung in entscheidungstheoretische Grundlagen zur Auswahl von Verfahrensalternativen in der Trinkwasseraufbereitung und auch eine hierarchische Strukturierung von Zielen im Kontext der Trinkwasseraufbereitung.

Mithilfe der „Mind-Map-Technik“ konnten die relevanten Haupt-, Unterziele und Kriterien ausfindig gemacht werden und in eine systematische Ordnung gebracht werden. Die verfügbaren Daten zu den Verfahrensvarianten in Abschnitt 5.4 grenzten das Zielsystem weiter ein.

Das endgültige Zielsystem ist in Tabelle 29 dargestellt.

Das Oberziel bis zum Jahr 2040 ist die „Sicherung der Trinkwasserversorgung“. Der Erreichungsgrad dieses Ziels kann durch die Zielerfüllung der drei darunter stehenden Hauptziele „I optimale Trinkwasserbeschaffenheit“, „II hohe Wirtschaftlichkeit“ und „III hohe betriebliche Integration und Sicherheit“ beschrieben werden. Die „optimale Trinkwasserbeschaffenheit“ wird durch das Unterschreiten der gesetzlichen Grenzwerte der TrinkwV 2001 und die Entfernung der anthropogenen organischen Spurenstoffe

quantifiziert. Als Kriterien wurden die „Problemparameter“ Nitrat, Chlorid und Sulfat erwähnt. Die Gesamthärte stellt kein Kriterium dar, da bereits in den Mindestanforderungen eine Härte von 2,31 mmol/L erfüllt werden muss und alle Verfahren diesen Wert erreichen. Eine korrosionschemische Bewertung der möglichen Aufbereitungsvarianten kann nicht durchgeführt werden, da bei dem Verfahren der NF die benötigten Parameter des Reinwassers fehlen. Das Unterziel der „Entfernung der anthropogenen organischen Spurenstoffe“ wird durch den Entfernungsgrad der im Einzelbefund positiv nachgewiesenen anthropogenen organischen Spurenstoffe Carbamazepin, der Röntgenkontrastmittel (Iopamidol und Amidotrizoesäure), DMS, EDTA und Chloridazon Metabolite B und B1 beschrieben.

Zur Beurteilung der „Wirtschaftlichkeit“ der Verfahren, werden die bereits ermittelten „spezifischen variablen Betriebskosten“ und „spezifischen Fixkosten“ in Cent/m<sup>3</sup> hinzugezogen.

Das Hauptziel der „hohen betrieblichen Integration und Sicherheit“ beschreibt die Versorgungssicherheit, den Umweltschutz und Arbeitsschutz, aber auch die Möglichkeit der Integration der Verfahrensvarianten in die bestehende Aufbereitungsanlage bzw. die bestehenden Rahmenbedingungen.

Um die Entsorgung langfristig zu sichern, müssen die Wasser eine Einleitgenehmigung in den Main erhalten (Unterziel „Abwasser eignet sich zum Einleiten in Vorfluter“). Da die Kriterien hierfür von der zuständigen Behörde festgelegt werden, werden die Konzentrationswerte der Abwässer für Stickstoff und Phosphor herangezogen, die auch bei Abwasserbehandlungsanlagen eingehalten werden müssen. Zwei weitere Unterziele lauten demnach „Stickstoff- bzw. Phosphorkonzentration liegen unter den Einleitgrenzwerten für Abwasserbehandlungsanlagen der GK 4“. Die „hohe Gesamtanlagenausbeute“ ist ein Ziel, dass im Wesentlichen der Beurteilung der Effektivität der Anlage und dem Umweltschutz dient. Die Erfüllung des Ziels wird durch das Verhältnis von Abwasseranfall zu Trinkwasserabgabe beschrieben. Je höher das Verhältnis ist, umso höher sind der Abwasseranfall und der Rohwasserbedarf und umso niedriger ist demzufolge die Gesamtanlagenausbeute. Die CO<sub>2</sub>-Emission der Anlage steht zum einen für den nachhaltigen Umgang einer Aufbereitungsanlage mit natürlichen Ressourcen und zum anderen für deren Energieeffizienz. Beschrieben wird sie durch das Kriterium der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emission in g CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup>. Das Unterziel „hohe Flexibilität bei Bedarfssteigerung oder externen Schwankungen“ dient der zukünftigen Versorgungssicherheit. Beschrieben wird der Parameter durch das Verhältnis von Rohwasserentnahme zu wasserrechtlich bewilligter Rohwasserentnahmemenge. Arbeits- und Umweltschutz werden in dem Unterziel „geringes Gefährdungspotential ausgehend von Zusatzstoffen“ zusammengefasst. Als Kriterium wird das Gefährdungspotential, das von eingesetzten Zusatzstoffen bei der Aufbereitung ausgeht, abgeschätzt. Das Ziel einer hohen betrieblichen Integration wird zusätzlich durch einen „geringen Raumbedarf“ erreicht.

Tabelle 29: Zielsystem zum Vergleich der verschiedenen Aufbereitungsvarianten

	HAUPTZIEL	UNTERZIEL (I)	UNTERZIEL (II)	KRITERIEN
S I C H E R U N G  D E R  Z U K Ü N F T I G E N  W A S S E R V E R S O R G U N G	I optimale Trinkwasserbeschaffenheit	Verringerung der NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Konzentration		Konzentrationswert NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/L]
		Verringerung der Cl <sup>-</sup> -Konzentration		Konzentrationswert Cl <sup>-</sup> [mg/L]
		Verringerung der SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Konzentration		Konzentrationswert SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/L]
		Entfernung der anthropogenen organischen Spurenstoffe	Entfernung von Carbamazepin	Entfernungsgrad Carbamazepin [-]
			Entfernung von Röntgenkontrastmitteln (Iopamidol, Amidotrizoesäure)	Entfernungsgrad Röntgenkontrastmitteln (Iopamidol, Amidotrizoesäure) [-]
			Entfernung von N, N-Dimethylsulfamid	Entfernungsgrad von N, N-Dimethylsulfamid [-]
			Entfernung von EDTA	Entfernungsgrad von EDTA [-]
			Entfernung von Chloridazon Metabolit B und B1	Entfernungsgrad von Chloridazon Metabolit B und B1 [-]
	II hohe Wirtschaftlichkeit	Geringe variable Betriebskosten		Spezifische variable Betriebskosten [Cent/m <sup>3</sup> ]
		Geringe Fixkosten		Spezifische Fixkosten [Cent/m <sup>3</sup> ]
	III hohe betriebliche Integration und Sicherheit	Abwasser eignet sich zum Einleiten in den Vorfluter	Stickstoffwert liegt unter den Einleitgrenzwerten für Abwasserbehandlungsanlagen der GK 4	Stickstoff, gesamt [mg/L]
			Phosphorwert liegt unter den Einleitgrenzwerten für Abwasserbehandlungsanlagen der GK 4	Phosphor, gesamt [mg/L]
		Hohe Gesamtanlagenausbeute		Abwasseranfall/Trinkwasserabgabe [%]
		Geringe CO <sub>2</sub> -Emission		Spezifische CO <sub>2</sub> -Emission [g CO <sub>2</sub> -e/m <sup>3</sup> ]
		Hohe Flexibilität der Anlage bei Bedarfssteigerungen oder extremen Schwankungen		Rohwasserentnahme/wasserrechtlich bewilligte Menge [%]
		Geringes Gefährdungspotential ausgehend von Zusatzstoffen		Gefährdungspotential der Zusatzstoffe [-]
		Geringer Raumbedarf		Raumbedarf [-]

### 5.5.2 Ziel- und Kriteriengewichtung

Eine Schwäche der Nutzwertanalyse ist die subjektive Gewichtung der Ziele. Häufig wird diese nur geschätzt und verliert dadurch an Genauigkeit. Sobald eine höhere Anzahl an Zielen vorliegt, stellt sich die Frage, wie logisch die Gewichtung der Ziele ist und damit die Qualität der Entscheidung. Da das Hauptziel „III hohe betriebliche Integration und Sicherheit“ sechs Unterziele beinhaltet, wird die Zielgewichtung mittels der AHP- („Analytic Hierarchy Process“) Methode durchgeführt. Es wird keine Kriteriengewichtung durchgeführt, da jedem Unterziel nur ein Kriterium zugeordnet werden kann. Die



AHP-Methodik sieht einen paarweisen Vergleich der Ziele vor und misst über einen sogenannten Inkonsistenzfaktor die Logik und Qualität der Entscheidung. (Bucher, 2005)

Folgende Schritte werden beim AHP-Verfahren durchgeführt (Haberl, Brunner, & Starkl, 2004, S. 71f):

1. Aufstellung eines hierarchischen Zielsystems
2. Priorisierung der Ziele mittels paarweiser Vergleiche in Bezug auf ihre relative Wichtigkeit
3. Berechnung der Gewichtungsfaktoren
4. Konsistenzprüfung (parallel zu 2. und 3.)

Nachdem der erste Schritt bereits in Kapitel 5.5.1 erarbeitet wurde, wird nun Schritt 2 näher erläutert. Beim AHP-Verfahren werden die einzelnen Ziele, die jeweils zu einem übergeordneten Ziel gehören, in eine Evaluationsmatrix eingetragen. Im Anschluss erfolgt der paarweise Vergleich. Dabei muss die Frage beantwortet werden, welches Element in Bezug auf die Erfüllung des übergeordneten Ziels wichtiger ist. Die Bewertung erfolgt nach der Bewertungsskala in Tabelle 30 (aus (Saaty, 2000, S. 73) gefunden in (Peters & Zelewski, 2002, S. 9)). Die mathematisch anspruchsvollere und präzisere AHP-Methodik weist eine Bandbreite der Bewertung von 1 bis 9 auf und lässt damit eine differenziertere Bewertung zu als die Nutzwertanalyse (0 bis 1). Entlang der Hauptdiagonalen betragen alle Werte 1. Sie stellt gleichzeitig die Spiegelachse der Matrix dar. Das heißt, dass alle Werte unterhalb der Hauptdiagonale dem Reziproke der Werte oberhalb der Hauptdiagonale entsprechen und umgekehrt. (Peters & Zelewski, 2002, S. 8f)

Tabelle 30: Bewertungsskala nach Saaty für die AHP-Methodik

Mögliche Werte für $a_{ij}$	Bedeutung der möglichen Werte für $a_{ij}$
1	gleiche Bedeutung der beiden Elemente
3	etwas höhere Bedeutung eines Elements
5	deutlich höhere Bedeutung eines Elements
7	viel höhere Bedeutung eines Elements
9	sehr viel höhere Bedeutung eines Elements
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte
$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Wenn $a_{ij}$ einen der Werte von 1 bis 9 annimmt, ist $a_{ji}$ der Reziprokwert.

Wenn die Evaluationsmatrix  $E$  ausgefüllt ist, kann im dritten Schritt ihr Eigenvektor  $v$  berechnet werden. Dieser entspricht der Gewichtung der Ziele. Er ist definiert als ein von Null verschiedener Vektor, mit (Peters & Zelewski, 2002, S. 12):

$$Av = \lambda v \text{ mit } \lambda \in R \quad (10)$$

In Schritt 4 erfolgt nun die Überprüfung der Konsistenz des Paarvergleichs. Dazu werden der Konsistenzindex C. I. (C. I. = Consistency Index) und der Konsistenzwert C. R. (C. R. = Consistency Ratio) berechnet.

Der C. I. ergibt sich aus dem größten Eigenwert  $\lambda_{\max}$  und der Dimension  $n$  der Evaluationsmatrix. Bei vollkommener Konsistenz sind diese Werte gleich und C. I. nimmt folglich Null an. (Peters & Zelewski, 2002, S. 15)

$$C. I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

Der C. R. gibt letztlich an, ob ein Paarvergleich überarbeitet werden muss. Ist  $C. R. \geq 0,1$  muss eine Überarbeitung des Paarvergleichs in der Evaluationsmatrix erfolgen. (Peters & Zelewski, 2002, S. 15)

$$C. R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (12)$$

R. I. stellt den Random Index dar, der in Abhängigkeit von  $n$  aus der Tabelle 31 (Peters & Zelewski, 2002, S. 15) abgelesen werden kann. (Peters & Zelewski, 2002, S. 15)

Tabelle 31: Bestimmung des Random Index R. I.

n	R.I.	n	R.I.
2	0,00	9	1,45
3	0,52	10	1,49
4	0,89	11	1,51
5	1,11	12	1,54
6	1,25	13	1,56
7	1,35	14	1,57
8	1,40	15	1,58

Am Beispiel der Gewichtung der Unterziele zum Hauptziel „I optimale TW-Beschaffenheit“ kann die Zielgewichtung nach der AHP-Methodik in Anhang 17 nachvollzogen werden. Die Gewichtung aller Ziele kann dem angehängten Datenträger entnommen werden.

Tabelle 32 zeigt das Ergebnis der Zielgewichtung nach der AHP-Methodik.

Tabelle 32: Zielsystem mit Gewichtung der Ziele

	HAUPTZIEL	UNTERZIEL (I)	UNTERZIEL (II)	KRITERIEN
S I C H E R U N G  D E R  Z U K Ü N F T I G E N  W A S S E R V E R S O R G U N G	I optimale Trinkwasser- beschaffenheit <b>33 %</b>	Verringerung der NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Konzentration <b>20 %</b>		Konzentrationswert NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/L]
		Verringerung der Cl <sup>-</sup> - Konzentration <b>20 %</b>		Konzentrationswert Cl <sup>-</sup> [mg/L]
		Verringerung der SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Konzentration <b>20 %</b>		Konzentrationswert SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/L]
		Entfernung der anthropogenen organischen Spurenstoffe <b>40 %</b>	Entfernung von Carbamazepin <b>20 %</b>	Entfernungsgrad Carbamazepin [-]
			Entfernung von Röntgenkontrastmitteln (Iopamidol, Amidotrizoesäure) <b>20 %</b>	Entfernungsgrad Röntgenkontrastmitteln (Iopamidol, Amidotrizoesäure) [-]
			Entfernung von N, N- Dimethylsulfamid <b>20 %</b>	Entfernungsgrad von N, N- Dimethylsulfamid [-]
			Entfernung von EDTA <b>20 %</b>	Entfernungsgrad von EDTA [-]
			Entfernung von Chloridazon Metabolit B und B1 <b>20 %</b>	Entfernungsgrad von Chloridazon Metabolit B und B1 [-]
	II hohe Wirtschaftlich- keit <b>33 %</b>	Geringe variable Betriebskosten <b>50 %</b>		Spezifische variable Betriebskosten [Cent/m³]
		Geringe Fixkosten <b>50 %</b>		Spezifische Fixkosten [Cent/m³]
	III hohe betriebliche Integration und Sicherheit <b>33 %</b>	Abwasser eignet sich zum Einleiten in den Vorfluter <b>36 %</b>	Stickstoffwert liegt unter den Einleitgrenzwerten für Abwasserbehandlungs- anlagen der GK 4 <b>50 %</b>	Stickstoff, gesamt [mg/L]
			Phosphorwert liegt unter den Einleitgrenzwerten für Abwasserbehandlungs- anlagen der GK 4 <b>50 %</b>	Phosphor, gesamt [mg/L]
		Hohe Gesamtanlagen- ausbeute <b>11 %</b>		Abwasseranfall/ Trinkwasserabgabe [%]
		Geringe CO <sub>2</sub> - Emission <b>7 %</b>		Spezifische CO <sub>2</sub> -Emission [g CO <sub>2</sub> -e/m³]
		Hohe Flexibilität der Anlage bei Bedarfs- steigerungen oder extremen Schwankungen <b>20 %</b>		Rohwasserentnahme/ wasserrechtlich bewilligte Menge [%]
		Geringes Gefährdungs- potential ausgehend von Zusatzstoffen <b>20 %</b>		Gefährdungspotential der Zusatzstoffe [-]
		Geringer Raumbedarf <b>7 %</b>		Raumbedarf [-]

Die Hauptziele wurden gleichgewichtet, da der Werkleitung die Trinkwasserqualität, die den Anlass zur Betrachtung einer Aufbereitungserweiterung gab, ebenso wichtig ist, wie die Wirtschaftlichkeit und die betriebliche Integration und Sicherheit der Aufbereitungsanlage. Eine veränderte Gewichtung der Hauptziele kann sich auf das Gesamtergebnis auswirken. Eine Untersuchung dazu erfolgt in Kapitel 5.5.5 Sensitivitätsanalyse.

Das Unterziel „Entfernung der anthropogenen organischen Spurenstoffe“ wird im Hauptziel „I optimale Trinkwasserbeschaffenheit“ bedeutender eingeschätzt als die anderen Unterziele. Begründet wird dies mit einer steigenden Konzentration im Eigenwasser infolge einer höheren Eigenwasserförderung. Zudem würde die Relevanz einer Spurenstoffentfernung steigen, wenn zukünftig Grenzwerte für diese eingeführt werden. Andere Parameter sind überwiegend geologisch begründet (Chlorid und Sulfat) oder abhängig von landwirtschaftlichen Aktivitäten (Nitrat). Folglich werden die Sulfat- und Chlorid-Konzentrationswerte nicht über die Konzentrationswerte des jetzigen Eigenwassers steigen und liegen damit innerhalb des Trinkwassergrenzwertes. Die Nitratkonzentrationen sind seit Jahren abfallend und werden bei fortführendem Grundwasserschutz nicht weiter ansteigen. Demzufolge ist die Spurenstoffentfernung das wichtigste Unterziel zur Erfüllung des Hauptziels.

Die „spezifisch variablen Betriebskosten“ und die „spezifischen Fixkosten“ wurden vom Entscheidungsträger als gleich relevant eingeschätzt zur Erfüllung des Hauptziels einer „hohen Wirtschaftlichkeit“.

Da die Entsorgungsmöglichkeit der Konzentrate / Eluate maßgeblich die Einsatzmöglichkeit einer Variante entscheidet, wird dieses Unterziel als bedeutendstes innerhalb des Hauptziels „III betriebliche Integration und Sicherheit“ angesehen.

Die Flexibilität gibt an, wie flexibel ein Verfahren auf Bedarfsschwankungen reagieren kann. Der Parameter ist somit ein Merkmal der Versorgungssicherheit und wird als sehr bedeutend angenommen. Gleiches gilt für das Gefährdungspotential der Zusatzstoffe. Ein hohes Gefährdungspotential im Bereich Arbeits- und Umweltschutz bringt höhere betriebliche Aufwendungen mit sich.

Die Ausbeute der Anlage ist bedeutend für die Nachhaltigkeit der Wasserversorgungsanlage, denn sie ist ein Indikator für den Abwasseranfall und die Rohwasserentnahme.

Der Raumbedarf wird als weniger wichtig angesehen, da bereits ein Grundstück existiert und Platz vorhanden ist. Die CO<sub>2</sub>-Emission wird ebenfalls als weniger bedeutend für den Betrieb der Wasseraufbereitung angesehen.

### 5.5.3 Bestimmung der Zielfunktionen

Die Zielfunktionen sind maßgeblich dafür zuständig, die Zielwerte der Varianten in Zielerfüllungsfaktoren zu transformieren. Das heißt, dass den realen Werten bzw. Zielwerten über die Zielfunktion ein dimensionsloser Wert, der sogenannte Zielerfüllungsfaktor zugeordnet wird. Der Zielerfüllungsfaktor kann über den Zielerfüllungsgrad beschrieben werden und muss für alle Kriterien den gleichen Höchstwert aufweisen. Das „Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlungen“ des Bundesministeriums des Innern und Bundesverwaltungsamtes verweist auf eine 10-Punkte-Skala, die auch für die vorliegende Arbeit verwendet wird (siehe Tabelle 33 (Bundesministerium des Innern/Bundesverwaltungsamt, 2016, S. 313)).

Tabelle 33: Zuordnung der Zielerfüllungsfaktoren zum Zielerfüllungsgrad

Zielerfüllungsgrad	Zielerfüllungsfaktor
nicht erfüllt	0
gerade noch ausreichend	1
ausreichend	2
ausreichend-befriedigend	3
befriedigend	4
befriedigend-gut	5
gut	6
gut-sehr gut	7
sehr gut	8
sehr gut-überragend	9
überragend	10

Für jedes Kriterium wird im folgenden Schritt eine Zielfunktion bestimmt. Dazu muss für jeden Zielerfüllungsfaktor ein realer Wert festgelegt werden. Die Schwierigkeit besteht darin, eine Objektivität bei der Wertzuordnung zu wahren. Demnach muss die Wertezuordnung nachvollziehbar begründet werden.

#### **Zielfunktion Nitrat, Chlorid, Sulfat**

Da die TrinkwV 2001 die gesetzliche Grundlage für die Bewertung der Trinkwasserqualität vorgibt, entspricht die Erfüllung der Trinkwassergrenzwerte den Mindestanforderungen. Wasserversorger sind jedoch gewillt diese zu unterschreiten. Wenn die Rohwasserkonzentrationswerte die Grenzwerte der TrinkwV 2001 bereits einhalten, so sollten die Maximalkonzentrationswerte dem niedrigsten Erfüllungsgrad entsprechen.

Die natürliche Hintergrundkonzentration eines anthropogenen unbelasteten Wassers entspricht den Anforderungen an einen Zielerfüllungsgrad von 100 % also 10 Punkten. Diese sind bei Nitrat aufgrund der menschlichen Aktivitäten im ländlich geprägten Einzugsgebiet nicht möglich. Somit müssen andere Konzentrationswerte festgelegt werden. Die Chlorid- und Sulfatwerte sind überwiegend geologisch bedingt. Da die hohen Salzkonzentrationen zu korrosionschemischen Problemen führen, können die natürlichen

Konzentrationswerte nicht für 10 Punkte angenommen werden. Eine Orientierung erfolgt hier an dem minimalen Konzentrationswert des eingespeisten Trinkwassers (Mischwasser).

#### Nitrat

Einer Nitratkonzentration  $< 18 \text{ mg/L}$  werden 10 Punkte zugeordnet. Der Wert ergibt sich aus DIN EN 12502-3, nach der eine geringere selektive Korrosionswahrscheinlichkeit für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe vorliegt, wenn die Nitratkonzentrationswerte unter  $18,6 \text{ mg/L}$  liegen. Die höchsten Konzentrationswerte des Rohwassers lagen bei  $41 \text{ mg/L}$ , damit entspricht dieser Wert 0 Punkten. Alle weiteren Werte werden zwischen 18 und  $41 \text{ mg/L}$  linear interpoliert. Die Zielfunktion ist in Anhang 18 grafisch dargestellt.

#### Chlorid

Die maximale Chloridkonzentration im Rohwasser lag bei  $93 \text{ mg/L}$  und entspricht 0 Punkten. Der minimale Konzentrationswert im Mischwasser betrug  $39 \text{ mg/L}$  und wird 10 Punkten gleichgesetzt. Alle weiteren Werte werden zwischen 39 und  $93 \text{ mg/L}$  linear interpoliert. Die Zielfunktion kann Anhang 18 entnommen werden.

#### Sulfat

Da die Maximalwerte im Rohwasser den Grenzwert von  $250 \text{ mg/L}$  der TrinkwV 2001 überschreiten und der Grenzwert selbst noch innerhalb des schwach betonaggressiven Bereichs nach DIN 4030 liegt, wird der Konzentrationswert von  $200 \text{ mg/L}$  als Mindestanforderung, entsprechend 0 Punkten, festgelegt. Der höchste Zielerfüllungsgrad wird erreicht bei  $118 \text{ mg/L}$ . Dieser Wert entspricht dem Minimalwert des Mischwassers. Alle weiteren Werte werden zwischen 118 und  $200 \text{ mg/L}$  linear interpoliert. Anhang 18 beinhaltet ein Diagramm mit der dazugehörigen Zielfunktion.

#### **Zielfunktion spezifische variable Betriebskosten und spezifische Fixkosten**

Die Zielerfüllung der Kosten orientiert sich an der Vorgehensweise von Schneck (2006). Die Zuordnung des höchsten Zielerfüllungsfaktors (10 Punkte) für die „spezifisch variablen Betriebskosten“ und die „spezifischen Fixkosten“ erfolgt, wenn das Wasser mit der „günstigsten“ Variante aufbereitet wird. 0 Punkte werden vergeben bei der Aufbereitung des Wassers mit der „teuersten“ Variante. (Schneck, 2006, S. 58)

Damit liegt die Spannbreite für die „spezifisch variablen Betriebskosten“ zwischen  $9,6 \text{ Cent/m}^3$  (Variante 1) und  $11,4 \text{ Cent/m}^3$  (Variante 4). Für die „spezifischen Fixkosten“ ordnen sich die Kosten zwischen  $10,2 \text{ Cent/m}^3$  (Variante 3) und  $12,4 \text{ Cent/m}^3$  (Variante 2) ein. Die übrigen Kostenwerte werden linear interpoliert.

Die Zielfunktionen für die „spezifisch variablen Betriebskosten“ und die „spezifischen Fixkosten“ sind in Anhang 18 dargestellt.

**Zielfunktion Abwasserbeschaffenheit (Stickstoff und Phosphor)**

Ziel ist es eine Einleitgenehmigung für die Abwässer der Anlagen zu erhalten. Die Einleitgenehmigung kann mit Sicherheit erlangt werden, wenn Stickstoff und Phosphor sich nicht im Wasser befinden. Die Konzentrationswerte 0 mg/L entsprechen somit 10 Punkten. Für eine Einleitung sind keine Mindestanforderungen bekannt. Eine Orientierung erfolgt an den Einleitgrenzwerten für Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklasse 4. Ziel sollte die Unterschreitung der Grenzwerte sein. Demnach muss Stickstoff 18 mg/L und Phosphor 2 mg/L unterschreiten. Die Grenzwerte werden 0 Punkten gleichgesetzt. Die Konzentrationswerte der Varianten werden zwischen den Werten linear interpoliert. Die Zielfunktionen für die Phosphor- und Stickstoffkonzentrationswerte sind den Diagrammen in Anhang 18 zu finden.

**Zielfunktion Abwasseranfall/Trinkwasserabgabe (Gesamtanlagenausbeute)**

Bei einer zukünftig anfallenden maximalen Trinkwasserabgabe von 7.750.000 m<sup>3</sup>/a darf der Abwasseranfall nicht größer 21 % sein, wenn der Fremdwasserbezug auf 2.920.000 m<sup>3</sup>/a beschränkt wird und die wasserrechtlich genehmigte Rohwasserentnahme 6.500.000 m<sup>3</sup>/a beträgt. Hierbei wird ein Puffer von 5 % festgelegt. Das heißt, dass 16 % Abwasseranfall 0 Punkten entsprechen. Als optimale Gesamtanlagenausbeute wurden 5 % festgelegt. Diese kommen 10 Punkten gleich. Die Gesamtanlagenausbeuten wurden zwischen diesen Werten linear interpoliert. Die Zielfunktion der Gesamtanlagenausbeute ist in Anhang 18 zu finden.

**Zielfunktion spezifische CO<sub>2</sub>-Emission**

Da für die spezifische CO<sub>2</sub>-Emission keine weiteren Anhaltspunkte und Vergleichswerte außer die vorhandenen zur Verfügung stehen, werden die Zielerfüllungsgrade zwischen den maximalen realen Werten und den minimalen realen Werten interpoliert. 10 Punkte entsprechen dabei einer CO<sub>2</sub>-Emission von 161 g CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> (Variante 1) und 0 Punkten stimmen mit 303 g CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> (Variante 4) überein. Die dazwischenliegenden Werte werden linear interpoliert. Die Zielfunktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emission ist in Anhang 18 dargestellt.

**Zielfunktion Rohwasserentnahme/ wasserrechtlich bewilligte Entnahmemenge (Flexibilität)**

Das Kriterium Verhältnis Rohwasserentnahme zu wasserrechtlich bewilligter Entnahmemenge widerspiegelt die Möglichkeit der Anlage auf Bedarfsschwankungen zu reagieren. Je näher die Rohwasserentnahme an der wasserrechtlich bewilligten Entnahmemenge liegt, umso weniger Flexibilität weist die Aufbereitungsanlage auf. Ab einem Verhältnis von 90 % wird das Ziel nicht mehr erfüllt. Der optimale Bereich einer Aufbereitungsanlage wurde hier zwischen 65 und 75 % angenommen. Da die Annahme getroffen wird, dass bei Fortführung, der jetzigen Ausnutzung des Wasserrechts dieses

zukünftig nicht aufrechterhalten werden kann, wird ab einem Verhältnis von 51 % erneut die Punktzahl 0 vergeben. Die Punktzahlen zwischen den genannten Werten werden linear interpoliert. Anhang 18 beinhaltet die grafische Darstellung der Zielfunktion.

#### **Zielerfüllungsfaktor anthropogene organische Spurenstoffe, Raumbedarf, Gefährdungspotential Zusatzstoffe**

Der Zielerfüllungsfaktor für die Kriterien „Entfernung anthropogener organischer Spurenstoffe“ (Carbamazepin, Röntgenkontrastmittel (Amidotizoesäure, Iopamidol), N, N-Dimethylsulfamid, EDTA, Chloridazon Metabolit B und B1), „Gefährdungspotential ausgehend von Zusatzstoffen“ und „Raumbedarf“ wurde nach den Zielwerten Entfernungsgrad, Raumbedarf und Gefährdungspotential festgelegt. Die Zuordnung ist der Tabelle 34 zu entnehmen.

Tabelle 34: Zuordnung Zielerfüllungsfaktor zu Zielwerten der Kriterien Spurenstoffentfernung, Gefährdungspotential Zusatzstoffe und Raumbedarf

	Gefährdungspotential Zusatzstoffe; Raumbedarf	Organische Spurenstoffentfernung
sehr hoch	0	10
	1	9
hoch bis sehr hoch	2	8
hoch	3	7
	4	6
mittel	5	5
	6	4
gering	7	3
keine bis gering	8	2
	9	1
keine	10	0

#### **5.5.4 Bewertung**

Mithilfe des vorhergehenden Kapitels ist es nun möglich die Zielwerterträge in Zielerfüllungsfaktoren ( $Zf$ ) zu transformieren und diese mit den Gewichtungsfaktoren ( $Gf$ ) zu multiplizieren. Für jedes Kriterium ergibt sich ein Teilnutzwert ( $TN$ ):

$$TN = Gf * Zf \quad (13)$$

Die Summe der Teilnutzwerte der Kriterien innerhalb eines Unterziels ergibt den Teilnutzwert des Unterziels. Hat ein Unterziel nur ein Kriterium so entspricht der Teilnutzwert des Kriteriums dem Teilnutzwert des Unterziels. Die Summe der Teilnutzwerte der Unterziele kommt dem Teilnutzwert des Hauptziels gleich. Die Summe der Teilnutzwerte der Hauptziele entspricht dem Gesamtnutzwert der Variante.

$$TN(\text{Unterziel}) = \sum(\text{Kriterien}) \quad (14)$$

$$TN(\text{Oberziel}) = \sum TN(\text{Unterziel}) \quad (15)$$



$$GN(\text{Variante}) = \sum TN(\text{Oberziele}) \quad (16)$$

Für die vier Aufbereitungsvarianten ergibt sich die nachfolgende Bewertungsmatrix (Vergleich (Tabelle 35)). Die Berechnung kann dem angehängten Datenträger entnommen werden.

Von einem maximal erreichbaren Punktestand von 10 hat die Variante 3 mit 6,42 Punkten Rang 1 belegt, gefolgt von Variante 1 mit 6,25 Punkten. Rang 3 wird mit 5,65 Punkten von Variante 2 belegt. Die schlechteste Variante stellt mit 4,84 Punkten die Variante 4 dar. Die nachfolgende Abbildung 29 zeigt das Ergebnis der Nutzwertanalyse grafisch. Dabei wird der geringe Unterschied zwischen den Varianten 1 und 3 deutlich. Variante 1 weicht lediglich um 2,6 % von Variante 2 ab. Die schlechteste Variante weicht hingegen um 25 % von der Vorzugsvariante ab. Eine genauere Betrachtung der Teilnutzwerte in Abbildung 29 offenbart, dass Variante 3 mit Abstand die höchste Wirtschaftlichkeit besitzt. Bezüglich der Erfüllung des Ziels der optimalen Trinkwasserbeschaffenheit sind alle vier Varianten beinahe gleichauf. In Punkto betriebliche Integration und Sicherheit fallen die Varianten 3 und 4 jedoch deutlich von den Varianten 1 und 2 ab.

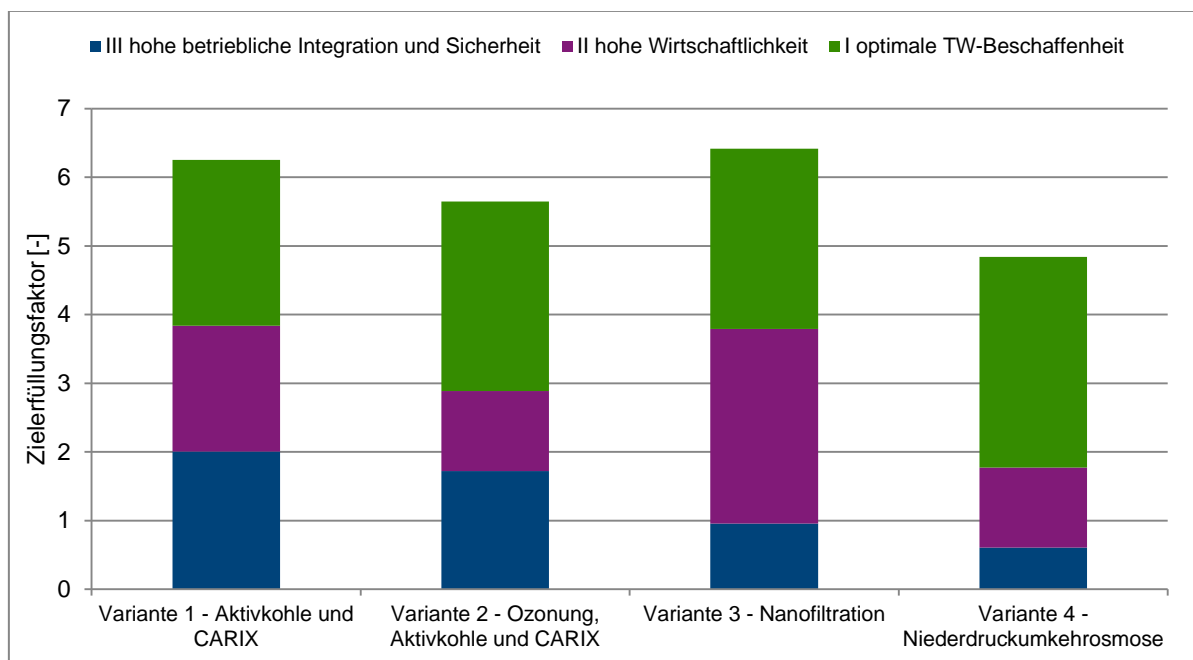


Abbildung 29: Grafische Darstellung der Teil- und Gesamtnutzwerte

Tabelle 35: Bewertungsmatrix für die Aufbereitungsvarianten im WW Sulzfeld

			Gewichtung Hauptziele	Gewichtung Unterziele	Zielwert 100 % (10 Punkte)	Zielwert 0 % (0 Punkte)	Variante 1 - AKF/CARIX	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 2 - OZ/AKF/CARIX	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 3 - NF- Anlage	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 4 - LPRO- Anlage	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel
<b>I optimale TW- Beschaffenheit</b>	<b>Kriterien</b>		<b>0,33</b>															
Verringerung der NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Konzentration	Konzentrationswert NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L		0,20	18	41	20	9	1,8	20	9	1,8	23	8	1,6	12	10	2
Verringerung der CL <sup>-</sup> -Konzentration	Konzentrationswert CL <sup>-</sup>	mg/L		0,20	39	93	38	10	2	38	10	2	42	9	1,8	23	10	2
Verringerung der SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Konzentration	Konzentrationswert SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L		0,20	118	200	64	10	2	64	10	2	65	10	2,0	65	10	2
Entfernung der anthropogenen organischen Spurenstoffe	Entfernungsgrad der relevanten Spurenstoffe			0,40														0
	• Carbamazepin	[-]		0,20	siehe Tab.	siehe Tab.	hoch bis sehr hoch	8	0,6	hoch bis sehr hoch	8	0,6	hoch bis sehr hoch	8	0,6	hoch bis sehr hoch	8	0,6
	• Röntgenkontrast- mittel	[-]		0,20	siehe Tab.	siehe Tab.	gering	3	0,2	keine bis gering	2	0,2	hoch bis sehr hoch	8	0,6	hoch bis sehr hoch	8	0,6
	• N, N- Dimethylsulfamid	[-]		0,20	siehe Tab.	siehe Tab.	keine	0	0,0	hoch bis sehr hoch	8	0,6	mittel	5	0,4	hoch bis sehr hoch	8	0,6
	• EDTA	[-]		0,20	siehe Tab.	siehe Tab.	keine	0	0,0	mittel	5	0,4	hoch	7	0,6	hoch bis sehr hoch	8	0,6
	• Chloridazon Metabolit B und B1	[-]		0,20	siehe Tab.	siehe Tab.	hoch	7	0,6	hoch bis sehr hoch	8	0,6	gering	3	0,2	hoch bis sehr hoch	8	0,6
<b>Teilnutzwert Zielgruppe I</b>									<b>7,24</b>			<b>8,28</b>			<b>7,88</b>			<b>9,20</b>

			Gewichtung Hauptziele	Gewichtung Unterziele	Zielwert 100 % (10 Punkte)	Zielwert 0 % (0 Punkte)	Variante 1 - AKF/CARIX	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 2 - OZ/AKF/CARIX	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 3 - NF- Anlage	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 4 - LPRO- Anlage	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel
<b>II hohe Wirtschaftlichkeit</b>	<b>Kriterien</b>		<b>0,33</b>															
variable Betriebskosten	spezifische variable Betriebskosten	Cent/m <sup>3</sup>		0,50	9,6	11,4	9,6	10	5	10,1	7	3,5	10,2	7	3,5	11,4	0	0
Fixkosten	spezifische Fixkosten	Cent/m <sup>3</sup>		0,50	10,2	12,4	12,3	1	0,5	12,4	0	0,0	10,2	10	5,0	10,9	7	3,5
<b>Teilnutzwert Zielgruppe II</b>									5,50			3,50			8,50			3,50
<b>III hohe betriebliche Integration und Sicherheit</b>	<b>Kriterien</b>		<b>0,33</b>															
Abwasser eignet sich zum Einleiten in Vorfluter (Entsorgungssicherheit)	Abwasserbeschaffenheit			0,36														
	• Phosphor	mg/L		0,50	0	2	0	10	1,8	0	10	1,8	0,96	5	0,9	0,79	6	1,1
	• Stickstoff	mg/L		0,50	0	18	18,8	0	0,0	18,8	0	0,0	13,8	2	0,4	27,7	0	0
hohe Gesamtanlagen- ausbeute	Abwasseranfall/TW- Abgabe	%		0,11	5	16	8,6	7	0,8	8,6	7	0,8	10,5	5	0,6	13,3	2	0,2
geringe CO <sub>2</sub> - Emission	spezifische CO <sub>2</sub> - Emission	g CO <sub>2</sub> - e/m <sup>3</sup>		0,07	161	303	161	10	0,7	181	9	0,6	270	2	0,1	303	0	0
hohe Flexibilität bei Bedarfs- steigerungen oder extremen Schwankungen	Rohwasserentnahme/ wasserrechtlich bewilligte Menge	%		0,20	siehe Fkt.	siehe Fkt.	83,1	5	1,0	83,1	5	1,0	85,4	3	0,6	88,7	1	0,2

			Gewichtung Hauptziele	Gewichtung Unterziele	Zielwert 100 % (10 Punkte)	Zielwert 0 % (0 Punkte)	Variante 1 - AKF/CARIX	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 2 - OZ/AKF/CARIX	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 3 - NF- Anlage	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel	Variante 4 - LPRO- Anlage	Zielerfüllungsfaktor	Zielerfüllungsfaktor x Gewichtung Unterziel
geringes Gefährdungs- potential ausgehend von Zusatzstoffen	Gefährdungspotential Zusatzstoffe	[-]		0,20	siehe Tab.	siehe Tab.	keine bis gering	8	1,6	mittel	5	1,0	sehr hoch	0	0,0	sehr hoch	0	0
geringer Raumbedarf	Raumbedarf	[-]		0,07	siehe Tab.	siehe Tab.	hoch	3	0,2	sehr hoch	0	0,0	mittel	5	0,3	mittel	5	0,3
Teilnutzwert Zielgruppe III									6,02			5,16			2,88			1,83
<b>Nutzwert- Gesamt</b>									<b>6,25</b>			<b>5,65</b>			<b>6,42</b>			<b>4,84</b>
<b>Rang</b>									<b>2</b>			<b>3</b>			<b>1</b>			<b>4</b>

Abbildung 29 lässt darauf schließen, dass die Variante 3 hauptsächlich durch die hohe Wirtschaftlichkeit Rang 1 einnimmt. Die Hauptziele wurden jedoch gleich gewichtet. Der Grund hierfür lässt sich bei einer genaueren Betrachtung der prozentualen Gewichtung der Unterziele bezogen auf das Gesamtsystem in Abbildung 30 herausfinden. Die Grafik zeigt, dass die zwei Unterziele der Wirtschaftlichkeit mit jeweils 17 % den größten prozentualen Anteil am Gesamtsystem einnehmen. Hierbei lässt sich eine Schwäche des Systems erkennen. Die kleinere Anzahl der Unterziele innerhalb eines Hauptziels lassen diesen eine höhere Wichtigkeit zukommen, als Unterziele innerhalb anderer Hauptziele mit einer höheren Anzahl an Unterzielen. Die einflussreichsten Unterziele im Bewertungssystem sind, neben den Kosten, die Entfernung der relevanten anthropogenen organischen Spurenstoffe (13 %) und die Abwasserbeschaffenheit (12 %).

Demnach stellt sich die Frage, wie robust das Ergebnis der Nutzwertanalyse ist. Im nachfolgenden Kapitel 5.5.5 Sensitivitätsanalyse soll dieser Frage nachgegangen werden.

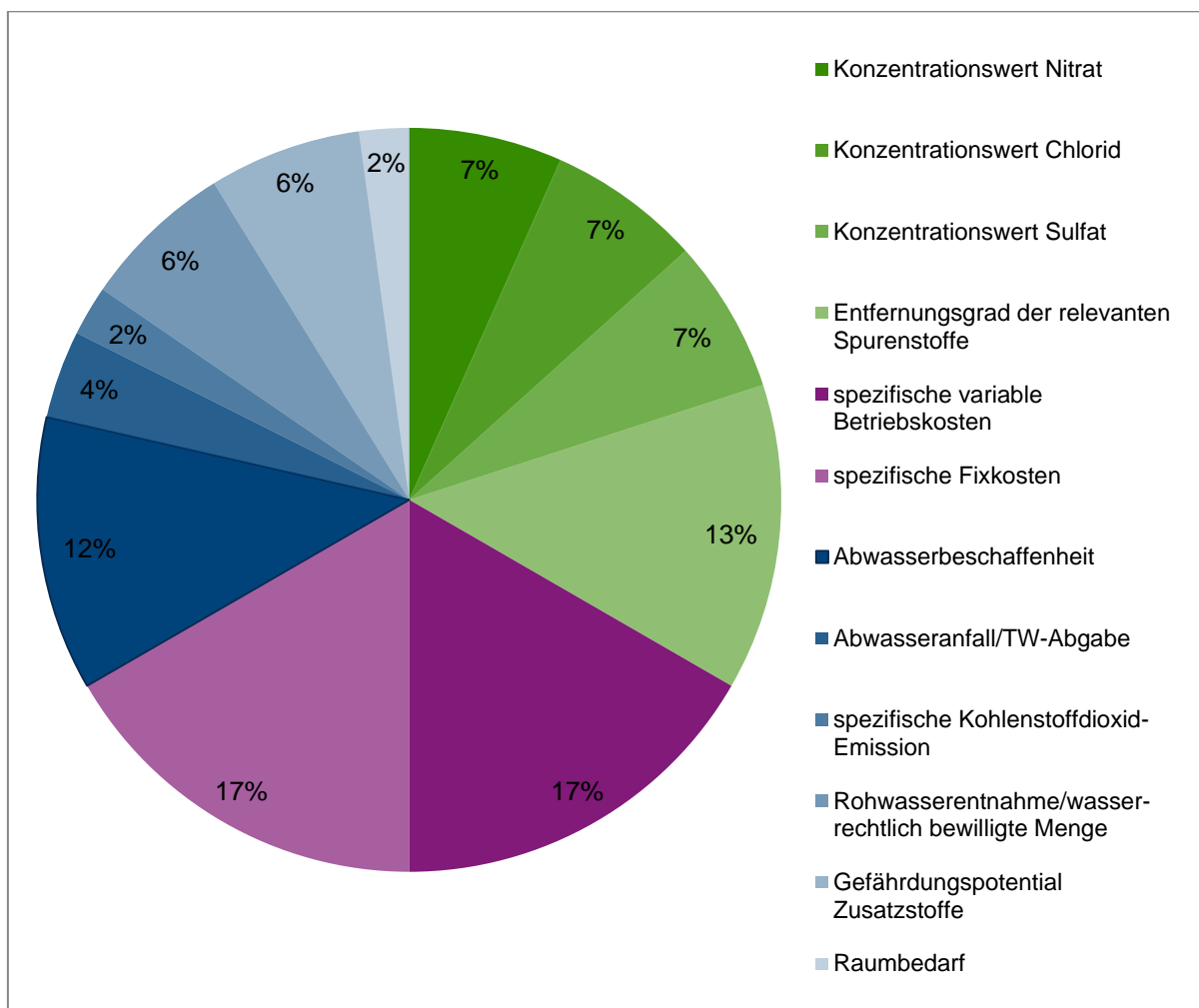


Abbildung 30: Grafische Darstellung der Gewichtung der Unterziele im Gesamtsystem

### 5.5.5 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse dient im Allgemeinen der Ermittlung der Robustheit bzw. Empfindlichkeit eines Systems. Diese kann bspw. durch die Auswirkung der Veränderung risikobehafteter Werte auf die Lösung ermittelt werden. Dazu müssen zunächst die kritischen Größen des Bewertungssystems ermittelt werden. Die größte Unsicherheit der Eingangsparameter liegt in der Kostenschätzung. Die Werte für die variablen Betriebskosten und die Fixkosten können bei veränderten Annahmen z. B. der Standzeit der Aktivkohle oder der Lebensdauer der Membranen variieren. Da eine Überprüfung jedes risikobehafteten Parameters zu aufwändig wäre, soll hier auf Wunsch des Entscheidungsträgers nur überprüft werden, welche Auswirkung der Verzicht auf die Aktivkohle im Teilstrom der NF- und der LPRO-Anlage hätte. Diese Annahme führt zu veränderten spezifischen Fixkosten (siehe Abschnitt 5.4.2.1 und 5.4.2.2.). Eine Betrachtung der Gesamtnutzwerte zeigt jedoch, dass sich lediglich der Gesamtnutzwert der LPRO-Anlage erhöht aufgrund der geringeren Kosten (Zielerfüllungsfaktor der spezifischen Fixkosten erhöht sich von 7 Punkte auf 8 Punkte). Der Gesamtnutzwert der NF-Anlage bleibt gleich, da diese als „günstigste Variante“ unverändert 10 Punkte für die spezifischen Fixkosten erhält. Das Ranking bleibt ebenfalls unverändert. Die Gesamtnutzwerte sind in Abbildung 31 grafisch dargestellt. Bezüglich der Wirtschaftlichkeit übersteigt das LPRO-Verfahren die CARIX-Anlage in Kombination mit Aktivkohle und Ozonung.

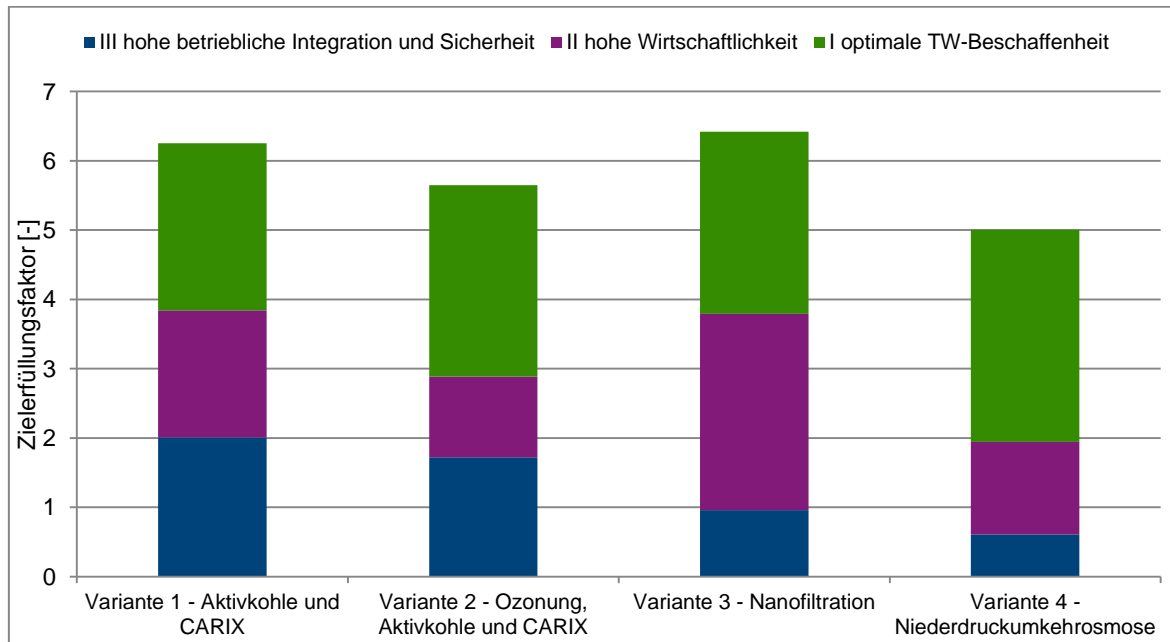


Abbildung 31: Veränderte Gesamtnutzwerte bei Verzicht auf Aktivkohle im Nebenstrom der Membrananlagen

Durch „Gewichtungsszenarien“ kann ebenfalls die Sensitivität der Bewertungsmethodik erfasst werden. Dafür wurden in dieser Arbeit die Hauptziele unterschiedlich gewichtet und die Auswirkungen festgehalten. Abbildung 32 zeigt die Veränderung der

Gesamtnutzwerte gegenüber der Ausgangssituation (Gleichgewichtung = rote Balken). Dazu wurde jeweils eines der Hauptziele mit 60 % gewichtet und die jeweils anderen Ziele mit 20 %. Auffällig ist, dass die Variante 1 die geringsten Schwankungen der Gesamtnutzwerte bei veränderter Gewichtung zeigt. Das lässt deutlich erkennen, dass dieses Verfahren alle drei Hauptziele gut erfüllt. Im Gegensatz zu Variante 1 erfüllt Variante 4 nur das Ziel einer optimalen TW-Beschaffenheit. Die veränderte Gewichtung der Hauptziele zeigt aber nicht nur die Stärken und Schwächen der Aufbereitungsverfahren an. Weitaus wichtiger ist die Veränderung des Rankings in Folge einer Veränderung der Gewichtung. Diese hat jedoch kaum einen Einfluss, denn Variante 3 bleibt unverändert auf Rang 1. Lediglich eine Gewichtung des Hauptziels der betrieblichen Integration und Sicherheit mit 60 % lässt die Anlage auf Rang 3 absinken. Hier zeigt sich wiederum deutlich, welches Ziel die NF-Anlage unzureichend erfüllt. Dafür nimmt die Variante 1 Rang 1 ein. Variante 4 belegt kontinuierlich den letzten Rang und stellt somit eindeutig die schlechteste Variante dar. Variante 2 besetzt Rang 3 auch bei veränderter Gewichtung. Bei einer Gewichtung des Hauptziels der Trinkwasserbeschaffenheit bzw. der betrieblichen Integration und Sicherheit mit 60 % erlangt die CARIX-Anlage mit Aktivkohle und Ozonung sogar Rang 2.

Es bleibt festzuhalten:

- Ob Gleichverteilung der Gewichte oder Festlegung eines Hauptgewichts, Variante 4 stellt stets die schlechteste Aufbereitungsvariante und damit Rang 4 dar.
- Eine Gleichverteilung der Zielgewichte und die Gewichtung der Wirtschaftlichkeit mit 60 % bewirken folgende Reihenfolge: Variante 3: Rang 1; Variante 1: Rang 2; Variante 2: Rang 3; Variante 4: Rang 4.
- Die Gewichtung der betrieblichen Integration und Sicherheit mit 60 % verändert das Ranking: Variante 1: Rang 1; Variante 2: Rang 2; Variante 3: Rang 3; Variante 4: Rang 4.
- Die Gewichtung der Trinkwasserbeschaffenheit mit 60 % ergibt folgendes Ranking: Variante 3: Rang 1; Variante 2: Rang 2; Variante 1: Rang 3; Variante 4: Rang 4.

Das System weist eine große Robustheit auf und reagiert recht unempfindlich auf Veränderungen der Hauptziel-Gewichtungen.

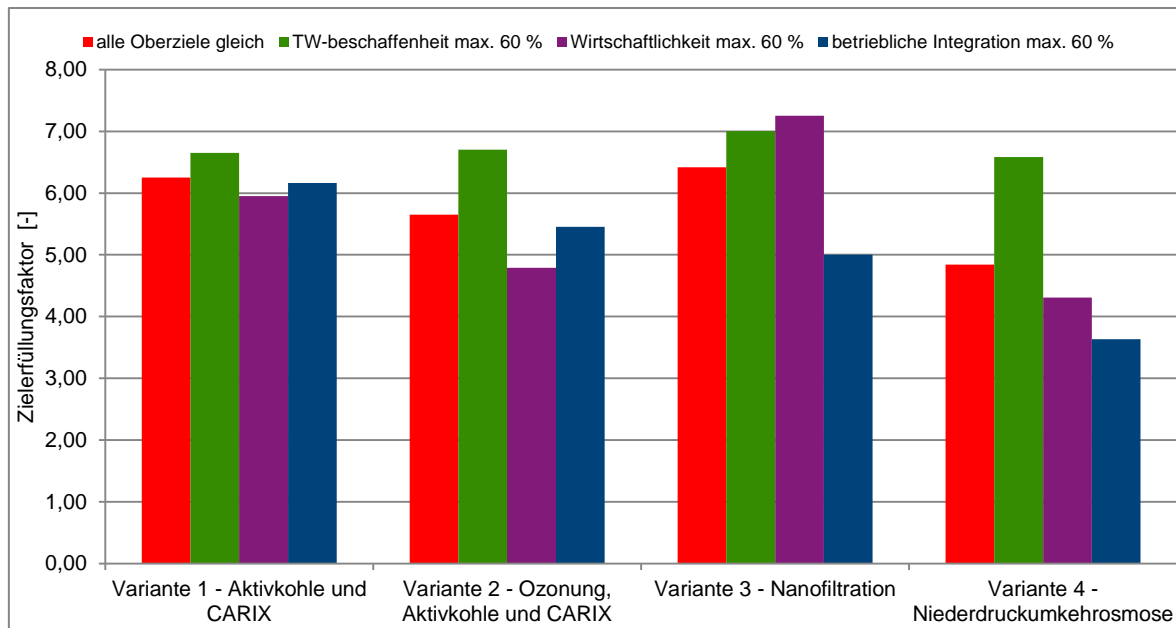


Abbildung 32: Auswirkung einer veränderten Gewichtung der Hauptziele auf die Gesamtnutzwerte

#### 5.5.5.1 Stärken und Schwächen der Methodik

Die Nutzwertanalyse ist ein leicht nachvollziehbares Bewertungsverfahren mit hoher Transparenz. Eine Entscheidungsfindung auf Basis eines „Bauchgefühls“ wird durch die Aufstellung eines Zielsystems, dass eine Vergleichbarkeit der Varianten miteinander herstellt, unterbunden.

Eine große Schwäche der Nutzwertanalyse ist jedoch die Subjektivität der Zielgewichtung. Um dieses Schwäche auszugleichen wurde das Verfahren der Nutzwertanalyse in dieser Arbeit mit der AHP-Methodik kombiniert. Hierdurch ist eine Gewichtung mittels paarweiser Vergleiche möglich, die Widersprüche verhindert und damit eine höhere Qualität der Aussage schafft. Nachteil der AHP-Methodik ist, dass sie mathematisch aufwändiger ist und mehr Zeit benötigt.

Eine weitere Schwäche der Nutzwertanalyse ist die Festlegung der Zielfunktionen. Da die Varianten nicht allgemeingültig sind, ist ein Vergleich mit Literaturwerten, die die Festlegung des „worst-cases“ und „best-cases“ ermöglichen, ausgeschlossen. Die Varianten mussten für bestimmte Kriterien relativ zueinander betrachtet werden. Deutlich wird dies am Bsp. des Hauptziels Wirtschaftlichkeit, hier wurden die besten Werte einer Variante als obere Grenze der Zielfunktion und die schlechtesten Werte einer Variante als unterste Grenze der Zielfunktion angenommen, da keine weiteren Literaturwerte verfügbar sind. Dabei sollte verinnerlicht werden, dass durch das Setzen der Grenzen schon indirekt eine Gewichtung vorgenommen wird, da die Abstände zwischen den Aufbereitungsvarianten beeinflusst werden. Dem Ergebnis der Nutzwertanalyse kann somit keine allgemeingültige Aussagekraft beigemessen werden.



Des Weiteren sind die Eingangsparameter nur für den anwendungsspezifischen Fall „WW Sulzfeld“ gültig. Eine Bewertung der Varianten für ein anderes WW würde die Eingangsparameter durchgehend verändern und damit zu anderen Ergebnissen führen.

Ein Vorteil der Nutzwertanalyse ist der Vergleich nicht-monetärer Größen miteinander. Ein Vergleich ist jedoch nur möglich, wenn die Eingangsparameter für alle Varianten vorhanden sind. Ein wichtiger Parameter, der im Hauptziel der optimalen Trinkwasserbeschaffenheit fehlt, ist die korrosionschemische Betrachtung des Trinkwassers, da die NF-Anlage hierzu keine Daten liefert.

Die Verteilung der Gewichte auf die Unterziele und Kriterien wird außerdem durch deren Anzahl innerhalb eines Hauptziels bzw. Unterziels beeinflusst. Somit kann ein Kriterium wesentlicher zum Ergebnis beitragen als ein anderes, obwohl ihm innerhalb eines Unterziels die gleiche Gewichtung beigemessen wird, wie einem anderen Kriterium innerhalb eines anderen Unterziels.

Da das Bewertungsverfahren auch zukünftig für den Entscheidungsträger einsetzbar sein soll, stellt die Anwendung der Nutzwertanalyse trotz ihrer Schwächen, die beste Option dar.

## 5.6 Empfehlung

Dem Gesamtnutzwert nach zu urteilen liegt die Variante 3: NF-Anlage auf Rang 1, auch bei einer Veränderung der Hauptzielgewichtung, mit Ausnahme der Hauptgewichtung der betrieblichen Integration und Sicherheit. Die NF-Anlage erfüllt die ökonomischen und qualitativen Ziele in sehr hohem Maße („sehr gut“). Das Hauptziel der betrieblichen Integration und Sicherheit wird jedoch nur „ausreichend“ erfüllt (Vergleich Tabelle 35). Variante 1: CARIX-Anlage in Kombination mit Aktivkohle kommt mit einem um 2,6 % abweichenden Gesamtnutzwert ebenso als Lösung in Frage. Die Variante erfüllt alle drei Hauptziele „gut“. Demnach ist zwischen diesen beiden Varianten abzuwägen.

Wie schon in Kapitel 5.4.2.1 „Weitere Informationen“ beschrieben, gibt es in Deutschland keine echten NF-Anlage mit KTW-Zulassung oder Prüfung nach DVGW W 270. Weiterhin befinden sich die Monitoringkonzepte zur Überwachung der Wasserqualität noch in der Entwicklung. Besonders NF-Membranen sind schwierig zu überprüfen, da sie weniger Salz zurückhalten als bspw. LPRO-Anlagen. Eine defekte NF-Membran würde das Risiko bergen, dass das Antiscalant durchbricht und in der nachgeschalteten Desinfektionsstufe mit Chlordioxid Transformationsprodukte bildet. Der Einbau einer Überwachungsstation in die Anlage würde die wirtschaftlichen Vorteile der Variante 3 verringern. Des Weiteren gibt es für die NF-Anlagen kein DVGW Arbeitsblatt. Außerdem fehlen bislang die korrosionschemischen Betrachtungen des Trinkwassers, die vor Einsatz der Anlage überprüft werden müssen.

Variante 1: CARIX mit Aktivkohle hat den Vorteil, dass die Anlage eine KTW-Zulassung besitzt und über das DVGW Arbeitsblatt W 235-3 verfügt. Bei dem Verfahren kommt es zu keinem Durchdringen von Zusatzstoffen, da außer CO<sub>2</sub> keine weiteren Stoffe eingesetzt werden. Eine korrosionschemische Betrachtung ergab lediglich eine geringe Korrosionswahrscheinlichkeit für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe ( $S_1=0,94$ ). Außerdem überschreitet die Variante 1 knapp den Stickstoffgrenzwert im Abwasser. Letztlich sind für die Kreisverwaltungsbehörde jedoch die Frachten entscheidend. Die Einleitmöglichkeit des Abwassers in den Main sollte zeitnah geprüft werden, da die Entsorgung des Abwassers sichergestellt werden muss. Ist eine Einleitung nicht möglich, so können die Anionenaustauscher ggf. angepasst werden. Die Aktivkohlefiltration gewährleistet keine Entfernung von DMS. Bei einer größeren Eigenwasserförderung sollte die Konzentrationsentwicklung dieses Stoffes im Rohwasser unbedingt überwacht werden.

Variante 2 und 4 fallen aufgrund ihres schlechten Gesamtnutzwertes aus. Auch wenn Variante 2 mit Ausnahme der Wirtschaftlichkeit eine sehr gute Variante darstellen würde, die sowohl alle Zulassungen, ein Technisches Regelwerk als auch über eine ausreichende Spurenstoffentfernung, insbesondere von DMS, verfügen würde.

Eine weitere Option wäre auf die Erweiterung des WW Sulzfeld zu verzichten und die derzeitige Eigenwasserförderung und den Fremdwasserbezug beizubehalten. Die bestehende Anlage könnte zukünftig um eine Aktivkohlefiltration ggf. mit Ozonung erweitert werden. Damit würde die FWF das Risiko eingehen, den Antrag zur Verlängerung des bestehenden Entnahmerechts nicht in vollem Maße gewährt zu bekommen. Der Fremdwasserbezug könnte weiterhin mit § 50 Abs. 2 WHG begründet werden, der sagt, dass, *„[d]er Wasserbedarf der öffentlichen Wasserversorgung [...] vorrangig aus ortsnahen Wasservorkommen zu decken [ist], soweit überwiegende Gründe des Wohls der Allgemeinheit dem nicht entgegenstehen. Der Bedarf darf insbesondere dann mit Wasser aus ortsfernen Wasservorkommen gedeckt werden, wenn eine Versorgung aus ortsnahen Wasservorkommen nicht in ausreichender Menge oder Güte oder nicht mit vertretbarem Aufwand sichergestellt werden kann“*. Da der Entscheidungsträger jedoch möglichst unabhängig bleiben will, ist ein Verzicht auf den vollen Umfang des bestehenden Wasserrechts von 6.500.000 m<sup>3</sup>/a nicht erwünscht und stellt somit keine Option dar. Es würde jedoch die naturnahste Wasseraufbereitungsoption darstellen.

Auch wenn die Nutzwertanalyse die NF-Anlage als bestes Verfahren für das WW Sulzfeld beschreibt, so wird aufgrund der genannten Gründe von einer Empfehlung der Anlage abgesehen. Möglicherweise könnte die Variante in einigen Jahren überprüft werden, in Hinblick auf eine KTW-Zulassung und ein ausgereiftes Monitoringkonzept. Bei einer erneuten Anwendung der Bewertungsmethodik zum Vergleich von Aufbereitungsvarianten sollten die nicht bewertbaren Kriterien (bspw. KTW-Zulassung, Vorhandensein von DVGW-Arbeitsblatt, Monitoringkonzept) in die Mindestanforderungen aufgenommen werden, um Anlagen direkt ausschließen zu können, die die Anforderungen nicht erfüllen.

Bis dahin stellt die Variante 1: CARIX-Anlage mit Aktivkohlefiltration die beste Lösung dar. Sie erfüllt alle drei Anforderungen, die an die zukünftige Aufbereitungsanlage gestellt werden in gutem Maße: die Lieferung einer optimalen Trinkwasserbeschaffenheit, eine gute Wirtschaftlichkeit und eine hohe Versorgungssicherheit mit bester Integration in die bestehenden Gegebenheiten. Auch wenn das Verfahren DMS nicht entfernt, so sollte der GOW im Trinkwasser nicht überschritten werden. Wenn der Fremdwasserzulauf bei 111 L/s 0 µg/L enthält und das Rohwasser aus der Eigengewinnung 1,2 µg/L bei einem Zulauf von 206 L/s beinhaltet, liegen im Trinkwasser nicht mehr als 0,8 µg/L DMS vor. Diese Konzentration liegt unter dem GOW. Da die Konzentrationswerte im Rohwasser aber auf einem Einzelbefund basieren, ist nicht auszuschließen, dass die Werte grundsätzlich höher sind. Demnach wird eine Untersuchung des Rohwassers auf anthropogene organische Spurenstoffe über einen längeren Zeitraum empfohlen. Die Konzentration des Fremdwassers beruht auf einer Annahme, auch hier ist eine Überprüfung zu empfehlen.

Bevor weitere Maßnahmen getroffen werden, muss die Variante in jedem Fall pilotiert werden. Die Pilotierung der Anlage dient der Ermittlung verfahrenstechnischer Parameter, wie der maximalen Ausbeute der Anlage, der Eluatzusammensetzung, der Einstellung der Regenerierphasen der Austauscherharze oder der Feststellung des Einflusses der Rohwasserbeschaffenheit. Erst danach kann die Anlage geplant und ggf. gebaut werden.

Sobald festgestellt werden kann, dass die organischen Spurenstoffe im Trinkwasser ausreichend gering sind bei Einsatz der Aktivkohle, kann mit der Pilotierung der CARIX-Anlage begonnen werden. Bereits in diesem Schritt sollte die Kreisverwaltungsbehörde hinzugeschaltet werden, da für die Entsorgungssicherheit der Anlage eine Genehmigung zur Einleitung des Abwassers mit erhöhten Nitratkonzentrationen in den Main notwendig ist. Wenn die verfahrenstechnischen Parameter im Zuge der Pilotierung bestimmt wurden, können die letzten Schritte, die Planung und der Bau folgen. Variante 1 kann auch so gebaut werden, dass zukünftig eine Nachrüstung auf Variante 2 möglich ist.

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Diese Masterarbeit ist ein Bestandteil der „Studie 2040“, die der zukünftigen Planung von Instandhaltungen und Investitionen dient. Innerhalb dieses Rahmens wird das WW bzw. der Versorgungsbereich Sulzfeld betrachtet. Anlass geben die im Jahr 2020 auslaufenden wasserrechtlichen Bewilligungen und die neu auszuhandelnden Wasserlieferungsverträge mit dem Wasserversorgungsunternehmen WFW.

Dazu wurde im ersten Teil der Arbeit eine Bestandsanalyse durchgeführt, die eine Wassermengenbilanz, eine Betrachtung der bestehenden Wasserlieferungsverträge und wasserrechtlichen Bewilligungen, eine Analyse der bestehenden Wasserqualität und eine Bestandsaufnahme des WW Sulzfeld beinhaltet. Es konnte festgestellt werden, dass das bestehende Wasserrecht nur zu 42 % ausgenutzt wird. Das Rohwasser weist einen hohen Härtegrad (5,87 mmol/L), sowie eine hohe Nitrat- (37 mg/L) und Sulfatkonzentration (240 mg/L) auf.

Im zweiten Teil wurden die zukünftigen Entwicklungen des Wasserbedarfs und der Wasserqualität bzw. die zukünftig an die Wasserqualität gestellten Anforderungen untersucht. Es konnte ein durchschnittlicher Tageswasserbedarf von 21.000 m<sup>3</sup>/d ermittelt werden. Weiterhin konnte die Notwendigkeit einer organischen Spurenstoffentfernung für die Zukunft festgestellt werden, denn das Eigenwasser der WGA Sulzfeld-Marktsteft besitzt einen Uferfiltrateinfluss. Deutlich wird dies an der Einzeluntersuchung aus dem Jahr 2010. Um das bestehende Wasserrecht in Zukunft nicht zu verlieren, will die FWF zukünftig mehr Eigenwasser fördern. Weniger Fremdwasser und mehr Eigenwasser bedeuten eine steigende Härte und einen steigenden Salzgehalt des Trinkwassers. Damit begründet sich die Notwendigkeit einer Enthärtung und Teilentsalzung.

Aus der Problemanalyse heraus konnten mögliche Aufbereitungsverfahren für das WW Sulzfeld erarbeitet werden. Um diese miteinander vergleichen zu können, wurde ein kriterienbasiertes Bewertungssystem erstellt, dass sowohl monetäre, als auch nicht-monetäre Kriterien einbezieht. Das Bewertungssystem basiert auf den Bewertungsmethoden Nutzwertanalyse und AHP. Der Vergleich der Varianten Aktivkohle und CARIX-Anlage; Ozonung, Aktivkohle und CARIX-Anlage; Nanofiltration und LPRO-Anlage bringt die Nanofiltration dem Gesamtnutzwert nach zu urteilen als bestes Aufbereitungsverfahren hervor. Die CARIX-Anlage mit Aktivkohle liegt mit einem Unterschied von 2,6 % auf Rang 2. Aufgrund verschiedener weiterer Nachteile der Nanofiltration, die in der Bewertungsmethodik nicht betrachtet werden konnten (z. B. KTW-Zulassung, Monitoringmöglichkeiten), wird die CARIX-Anlage mit Aktivkohle empfohlen. Da die Aktivkohle nicht alle anthropogenen organischen Spurenstoffe entfernt, ist zukünftig ein intensives Monitoring zu empfehlen, um sicherzustellen, dass das Trinkwasser am Wasserwerksausgang alle GOW einhält. Der vorhandene Einzelbefund stellt nur eine

Momentaufnahme dar. Langzeitbefunde zeigen auf, ob es sich bei den Einzelwerten eher um Mittel-, Minimal oder Maximalwerte handelt.

Die Arbeit hat verdeutlicht, dass das bestehende Aufbereitungsverfahren im WW Sulzfeld funktioniert, aber die zukünftigen Ziele der FWF (höhere Eigenwasserförderung, Verringerung Nitrat- und Sulfatkonzentration, organische Spurenstoffentfernung) damit nicht erreicht werden. Die Auseinandersetzung mit den zukünftigen Mindestanforderungen dezimiert die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten. Es zeigt sich, dass jedes Verfahren seine Vor- und Nachteile hat, auch wenn die Varianten der Membranverfahren und die Varianten des CARIX-Ionenaustauschverfahrens untereinander recht ähnlich sind. Die entwickelte Bewertungsmethode stellt eine Möglichkeit dar, diese Verfahren systematisch miteinander zu vergleichen. Sie bietet außerdem die Möglichkeit die Präferenzen des Entscheidungsträgers einfließen zu lassen. Das empfohlene Aufbereitungsverfahren der CARIX-Anlage in Kombination mit einer Aktivkohlefiltration stellt eine nachhaltige und zukunftsweisende Lösung dar, die neben einer Enthärtung und Teilentsalzung die Entfernung der organischen Spurenstoffe ermöglicht. Ob die Aktivkohle allein ausreicht oder doch um eine Ozonung erweitert werden muss, sollte überprüft werden. In jedem Fall hat die FWF mit ihrer Zukunftsplanung den richtigen Weg eingeschlagen, um sich den zukünftigen Herausforderungen zu stellen und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

## Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Statistik (LfStat). (2015). *Bayerisches Landesamt für Statistik-Bevölkerungsentwicklung in den bayerischen Kreisen bis 2034*. Abgerufen am 21. März 2016 von [https://www.statistik.bayern.de/medien/statistik/demwa/karte\\_bvb\\_2014\\_2034\\_internet.pdf](https://www.statistik.bayern.de/medien/statistik/demwa/karte_bvb_2014_2034_internet.pdf)
- Bayerisches Landesamt für Statistik (LfStat). (2016). *GENESIS-Online Datenbank*. Abgerufen am 6. Juni 2016 von Ergebnis - 12411-001, Bevölkerung: Gemeinden: <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=2&levelid=1465155806158&step=2>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). (2009). *Arzneimittelwirkstoffe und weitere polare Spurenstoffe in Roh- und Trinkwasser (gemeinsamer Bericht von LfU und LGL)*. Abgerufen am 27. April 2016 von [http://www.lfu.bayern.de/analytik\\_stoffe/arzneimittelwirkstoffe/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/arzneimittelwirkstoffe/index.htm)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). (2012). *Ausgleich und Verbund in der Wasserversorgung in Nordbayern (Fortschreibung der Studie der Regierung von Mittelfranken vom Juni 2005)*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV). (2015). *Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten*.
- Berg, P. (2002). *Rückhaltung von in der Trinkwasseraufbereitung relevanten organischen Spurenstoffen durch Nanofiltrationsmembranen*. Düsseldorf.
- Bergmann, A. (2011). *Organische Spurenstoffe im Wasserkreislauf, acatech Materialien Nr.12*. München.
- Bethmann, D., Müller, U., & Baldauf, G. (2012). *Spurenstoffentfernung aus weichen Brunnenwässern - Maximierung der Ausbeute und Minimierung der Einsatzmenge an Antiscalants im Betrieb einer Umkehrosmoseanlage Kurzfassung des Abschlussberichtes*. Karlsruhe: Offenburger Wasserversorgung GmbH; DVGW-Technologiezentrum Wasser.
- Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH. (2015). *Erweiterung des Dargebotes für die Wassergewinnungsanlage Sulzfeld (Landkreis Kitzingen)*.
- Brauch, H.-J. (2008). *Fachtagung Pflanzenschutzmittel-Metaboliten am 18./19. November 2008 - Kurzfassung der Vorträge. Möglichkeiten und Grenzen der Entfernung von*

- PSM-Metaboliten durch Aufbereitungsverfahren* (S. 36-39). Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Brauch, H.-J. (Juni 2009). Fachtagung Pflanzenschutzmittel-Metaboliten am 18./19. November 2008 - Gesamtfassung. *Möglichkeiten und Grenzen der Entfernung von PSM-Metaboliten durch Aufbereitungsverfahren* (S. 60-69). Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Bucher, J. (30. Januar 2005). *easy mind*. Abgerufen am 17. Juli 2016 von Vergleich Analytic Hierarchy Process & Nutzwertanalyse: <http://community.easymind.de/page-77.htm>
- Bundesministerium des Innern/Bundesverwaltungsamt. (2016). *Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlungen*. Bundesministerium des Innern/Bundesverwaltungsamt.
- Castell-Exner, C. (2016a). Trinkwasserqualität in Europa - Stakeholder meeting zur Evaluierung der EG-Trinkwasserrichtlinie am 8. Dezember 2015. *DVGW energie wasser-praxis 1* (2016), 10-11.
- Castell-Exner, C. (2016b). Die EG-Trinkwasserrichtlinie - künftig in neuem Zuschnitt? *DVGW energie wasser-praxis 4* (2016), 14-15.
- DIN 2000. (2000). Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen - Technische Regel des DVGW. Beuth-Verlag.
- Dördelmann, O., Panglisch, S., & Stetter, D. (12. November 2015). DVGW-Forschungsvorhaben W 4-01-14 Präsentation beim DVGW Forum Wasseraufbereitung. *Entwicklung eines Monitoringkonzepts zur Überwachung der Wasserqualität von RO/NF-Anlagen*. Mülheim an der Ruhr: IWW.
- DVGW. (April 2009). DVGW Wasser Information Nr. 72 - Nanofiltration und Umkehrosmose. Bonn.
- DVGW W 101 (A). (Juni 2006). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 101 (A) - Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser. Bonn.
- DVGW W 202 (A). (März 2010). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 202 (A) - Technische Regeln Wasseraufbereitung (TRWA) - Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung. Bonn.
- DVGW W 216 (A). (August 2004). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 216 (A) - Versorgung mit unterschiedlichen Trinkwässern. Bonn.

- DVGW W 225 (A). (Juni 2015). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 225 (A) - Ozon in der Trinkwasseraufbereitung. Bonn.
- DVGW W 235-1 (A). (Oktober 2009). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 235-1 (A) - Zentrale Enthärtung von Wasser in der Trinkwasserversorgung - Teil 1: Grundsätze und Verfahren. Bonn.
- DVGW W 239 (A). (März 2011). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 239 (A) - Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle. Bonn.
- DVGW W 253-3 (A). (April 2012). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 253-3 (A) - Zentrale Enthärtung in der Trinkwasserversorgung - Ionenaustauschverfahren. Bonn.
- DVGW W 254 (H). (April 1988). Technische Mitteilungen - Hinweis DVGW W 254 (H) - Grundsätze für Rohwasseruntersuchungen. Eschborn.
- DVGW W 410 (A). (Dezember 2008). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 410 (A) - Wasserbedarf- Kennwerte und Einflussgrößen. Bonn.
- Fernwasserversorgung Franken. (1994). Verbandssatzung. Uffenheim: Fernwasserversorgung Franken.
- Fernwasserversorgung Franken. (2001). *50 Jahre FWF - Die Quelle der Zukunft*. Uffenheim: Fernwasserversorgung Franken.
- Fernwasserversorgung Franken. (2012a). Grundpreis FWF Eigenwasser Gewinnungsgebiet Marktsteft-Sulzfeld bis Ausgang WW Sulzfeld. Uffenheim.
- Fernwasserversorgung Franken. (2012b). Arbeitspreis für FWM 2012. Uffenheim.
- Fernwasserversorgung Franken. (2015). *Betriebs- und Organisationshandbuch Wasserwirtschaft Teil 2: Wasserversorgung*. Uffenheim: SLT GmbH, FWF, NOW, RBG, RMG, STW.
- Fernwasserversorgung Franken. (2016a). *Grundwasserschutz und Wasserwirtschaft*. Abgerufen am 01. April 2016a von <http://www.fernwasser-franken.de/Unser-Trinkwasser/Grundwasserschutz-und-Wasserwirtschaft.html>
- Fernwasserversorgung Franken. (13. Januar 2016b). Wasserlieferungsvertrag zwischen FWM und FWF hier: ergänzendes Angebot der FWF mit 5.000 m<sup>3</sup>/Tag. Uffenheim.
- Fernwasserversorgung Franken. (o. J.). *Wasserwerk Sulzfeld*. Uffenheim.



- Fricke, J. (7./8.. März 2012). Betriebserfahrungen mit der Niederdruck-Umkehrosmoseanlage in Osnabrück - DVGW-Kurs Membrantechnik II Nanofiltration und Umkehrosmose. Göttingen.
- Fritsch, P., Hoch, W., Merkl, G., Ottilinger, F., Rautenberg, J., Weiß, M., et al. (2014). *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gauff Ingenieure. (06. April 1992). Aufbereitungsanlage Sulzfeld. *Funktionsbeschreibung (für die Aufstellung der Steuerung)*. Nürnberg.
- Greger, S. (November 2009). Präsentationsgrundlage Wasseraufbereitung - Membranverfahren.
- Greger, S. (29. Juni 2016a). Telefonat - Informationen zu LPRO und NF. (M. Krüger, Interviewer)
- Greger, S. (29. Juni 2016b). Email - Informationsanfrage für Masterarbeit WW Sulzfeld.
- Groß, H., Raue, B., Shi, Z., & Müller, U. (2011). *Nachhaltige Nanofiltration in der zentralen Trinkwasserenthärtung - Abschlussbericht über ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt gefördert durch deutsche Bundesstiftung Umwelt AZ 26375-23*. Karlsruhe: DVGW Technologiezentrum Wasser.
- Haberl, R., Brunner, N., & Starkl, M. (2004). *Erhebung, Analyse und Bewertung geeigneter Verfahren zur Variantenuntersuchung in der Siedlungswasserwirtschaft - Endbericht*. Lebensministerium Österreich.
- Haist-Gulde, B. (10. September 2014). Entfernung von organischen Spurenstoffen, Aufbereitungstechniken - Möglichkeiten und Grenzen. Hamburg.
- Hancke, K. (1998). *Wasseraufbereitung - Chemie und chemische Verfahrenstechnik*. Berlin Heidelberg: Springer- Verlag .
- Hein, A., Lévai, P., & Wencki, K. (2015). *Multikriterielle Bewertungsverfahren: Kurzbeschreibung und Defizitanalyse (Teil 3)*. Fachberichte gwf-Wasser I Abwasser: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH/ Vulkan-Verlag GmbH.
- Heix, H. (1991). *Betriebsanleitung, Funktionsbeschreibung für Trinkwasseranlage FWF Sulzfeld*. Kulmbach.
- INSUMMA - SHP - Pfenning. (2005). *Erweiterung Aufbereitungsanlage Sulzfeld BA 120 - Erläuterungsbericht*. Uffenheim.
- INSUMMA - SHP - Pfenning. (2005a). *Blockfließschema Aufbereitungsanlage Sulzfeld - Erweiterung Aufbereitungsanlage Sulzfeld BA 120*. Uffenheim.

- INSUMMA Projektgesellschaft mbH. (2000). *Sanierung und Ausbau der Werksanlagen bis zum Jahr 2020*. Uffenheim: Fernwasserversorgung Franken.
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR). (2010). *Auswertungsbericht Röntgenkontrastmittel - Bericht Nr. 187*. Koblenz: IKSR.
- Jekel, M. (24. September 2013). Querschnittsthema - Chemische Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf.
- Keller, D. (7. Februar 2013). *Statistik & Beratung Daniela Keller - Der Boxplot*. Abgerufen am 05. April 2016 von <http://www.statistik-und-beratung.de/2013/02/der-boxplot/#more-417>
- Klaassens, E., Kros, H., Romkens, P., de Vries, W., Hulsmann, A., & Schellekens, J. (2015). *Evaluation of the EU Drinking Water Directive*. Rotterdam: European Commission, DG Environment.
- Konrad, T. (20. Juli 2015). Aktennotiz. *Projektbetrachtung: WW Sulzfeld; Mischungsverhältnis Eigenwasser : WFW = 1/2: 1/2*. Sulzfeld.
- Konrad, T. (3. März 2016). Informationen zum Wasserwerk Sulzfeld. (M. Krüger, Interviewer)
- Krüger, M. (7. Juni 2016). Besichtigung WW Sulzfeld und WGA Sulzfeld-Marktsteft. Sulzfeld.
- Landratsamt Kitzingen. (27. Februar 2004). Verordnung des Landratsamtes Kitzingen über die Festsetzung eines erweiterten Trinkwasserschutzgebietes für das Erschließungsgebiet Sulzfeld. Kitzingen.
- Lenntech. (2016). *Lenntech- Aktivkohle als Filtermaterial*. Abgerufen am 21. Juli 2016 von aus: Wastewater Engineering; Metcalf & Eddy; third edition; 1991; page 317: <http://www.lenntech.de/bibliothek/adsorption/adsorption-de.htm>
- Löhner, H. (Juni 2015). Darstellung der FWF. *Wer ist eigentlich die Fernwasserversorgung Franken*. Uffenheim.
- Löhner, H. (13. Januar 2016). Wasserlieferungsvertrag zwischen FWM und FWF hier: Ergänzendes Angebot der FWF mit 5.000 m³/Tag. Uffenheim.
- Löhner, H. (2. März 2016a). Email: Prognose FWF 2040. Uffenheim.
- Müller, U. (2015). 5 Konzentrate der Umkehrosmose - besser als ihr Ruf? In *Veröffentlichungen aus dem DVGW-Technologiezentrum Wasser Band 70: Innovative Entwicklungen aus dem Forschungsradar Wasser* (S. 77-96). Karlsruhe: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser.

- Müller, U. (2015). Notiz: Verfahrenskonzept für Aufbereitungsanlage Sulzfeld, Kick-off Besprechung in Sulzfeld am 07.07.2015.
- Müller, U., Baldauf, G., Osmera, S., & Götsche, R. (Januar 2009). Erfassung und Bewertung von Nanofiltrations- und Niederdruckumkehrosmoseanlagen in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland. *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Förderung: DVGW (W 4/01/08), EnBW Forschung, RBS wave GmbH*. Karlsruhe: DVGW-Technologiezentrum Wasser.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. (2016). *Grundwasserschutz in Niedersachsen*. Abgerufen am 02. 08 2016 von [http://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht\\_niedersachsen/nutzung\\_schutz\\_und\\_ueberwachung/grundwasserschutz/grundwasserschutz\\_niedersachsen/grundwasserschutz-in-niedersachsen-105421.html](http://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/nutzung_schutz_und_ueberwachung/grundwasserschutz/grundwasserschutz_niedersachsen/grundwasserschutz-in-niedersachsen-105421.html)
- Peters, M., & Zelewski, S. (2002). *Arbeitsbericht Nr. 14 Analytical Hierarchy Process (AHP) - dargestellt am Beispiel der Auswahl von Projektmanagement-Software zum Multiprojektmanagement*. Essen: Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement - Universität Essen .
- Pinnekamp, J., & Bolle, F.-W. (2011). *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I*. Aachen: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Rautenberg, J. (14. Januar 2016). Allgemeine Informationen zur FWF. (M. Krüger, Interviewer)
- Rautenberg, J. (21. Januar 2016a). Nachfrage Mischungsverhältnis. (M. Krüger, Interviewer)
- Rautenberg, J. (15. März 2016b). Quantitative Analyse Nachbesprechung. (M. Krüger, Interviewer)
- Roth, U., Berger, H., Müller, A., & Wagner, H. (2008). Höhe und Häufigkeit von Wasserbedarfsspitzen bei der Hessenwasser GmbH & Co. KG. *GWF - Wasser Abwasser*, 149(11), 864-871.
- Saaty, T. (2000). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh: 2. Auflage.
- Sauer, U. (12. Oktober 2015). Sustainable Water Treatment Solutions. Bayreuth.
- Sauer, U. (2016). *Vorstudie zur zentralen Enthärtung des Trinkwassers im WW Sulzfeld (LPRO-CARIX)*. Bayreuth: Veolia Water Technologies Deutschland GmbH.

- Schindler, E. (04. Juli 2016). Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz - Interview Abwasserabgabe. (M. Krüger, Interviewer)
- Schneck, A. (2006). *Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Belange der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes*. Stuttgart: Institut für Wasserbau an der Universität Stuttgart.
- Sixt, Heiß + Partner GbR Ingenieurbüro. (2005). FWF Fernwasserversorgung Franken - Erweiterung der Aufbereitungsanlage Sulzfeld - Landkreis Kitzingen, Gestaltung der Aufbereitung. *Schreiben vom 13.05.2005 zur Bewertung der bisherigen Entwicklung der Planung*. Markt Schwaben.
- Stetter, D., & Dördelmann, O. (Mai 2016). Ergebnisse aus dem DVGW-Forschungsvorhaben Monitoringkonzept zur Überwachung der Wasserqualität von Umkehrosmose (RO) und Nanofiltration (NF) . *IWW Journal - Nachrichten aus dem IWW Zentrum Wasser Ausgabe 44*, S. 6.
- Sturm, S., Kiefer, J., Kollotzek, D., & Rogg, J.-M. (Oktober 2010). Aktuelle Befunde der Metaboliten von Tolyfluamid und Chloridazon in den zur Trinkwasserversorgung genutzten Grundwasservorkommen Baden-Württembergs. *gwf-Wasser Abwasser*, S. 950-959.
- Technische Universität Berlin. (2004). *Technisch-ökologische und ökonomische Evaluierung alternativer Wasseraufbereitungsverfahren an den Beispielen Arsenelimination und zentrale Trinkwasserenthärtung*. Berlin: Schlussbericht zum BMBF/DVGW - Forschungsvorhaben.
- Technologiezentrum Wasser (TZW). (23. August 2007). *Begründung der Notwendigkeit des Einsatzes einer Aktivkohlefiltration in den Uferfiltratwasserwerken der Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz GmbH (FWV)*. Dresden: Technologiezentrum Wasser (TZW) Karlsruhe Außenstelle Dresden.
- Trinkwasserverordnung (TrinkwV). (2001). Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. November 2015 (BGBl. I S. 2076) geändert worden ist.
- Umweltbundesamt. (31. Januar 2012). *Umweltbundesamt - Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) für nicht relevante Metaboliten (nrM) von Wirkstoffen aus Pflanzenschutzmitteln (PSM)*. Abgerufen am 25. Mai 2016 von [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/tabelle\\_gow\\_nrm1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/tabelle_gow_nrm1.pdf)
- Umweltbundesamt. (Januar 2014). *Liste der nach GOW bewerteten Stoffe*. Abgerufen am 29. April 2016 von [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/liste\\_gow\\_uba\\_201402.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/liste_gow_uba_201402.pdf)

- Urban, W. (2013). *Skript zur Vorlesung Trinkwassergüte und Wasseraufbereitungstechnik (M.Sc.) Wintersemester 2013/2014*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR.
- Vereinbarung. (2007/2008). Vereinbarung zur Laufzeitverlängerung des bestehenden Wasserlieferungsvertrags zwischen dem Zweckverband Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum (WFW) und dem Zweckverband Fernwasserversorgung Franken (FWF). Nürnberg; Uffenheim.
- VFZ - Verband Fränkischer Zuckerrübenbauer e.V. (Dezember 2015). Rundschreiben. Eibelstadt.
- Wasch- und Reinigungsmittelgesetz (WRMG). (2007). Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln. *Wasch- und Reinigungsmittelgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juli 2013 (BGBl. I S. 2538), das zuletzt durch Artikel 319 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist*.
- Wasserlieferungsvertrag. (1979). Wasserlieferungsvertrag zwischen dem Zweckverband Fränkischer Wirtschaftsraum (WFW) und dem Zweckverband Fernwasserversorgung Franken (FWF). Nürnberg.
- Wasserlieferungsvertrag. (1989). Wasserlieferungsvertrag zwischen dem Zweckverband Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum (WFW) und dem Zweckverband Fernwasserversorgung Franken (FWF). Nürnberg; Uffenheim.
- Wasserlieferungsvertrag. (1995). Wasserlieferungsvertrag zwischen dem Zweckverband Fernwasserversorgung Franken (FWF) und dem Zweckverband Fernwasserversorgung Mittelmain (FWM). Uffenheim; Würzburg.
- Wasserlieferungsvertrag. (2010). Wasserlieferungsvertrag zwischen dem Zweckverband Fernwasserversorgung Franken (FWF) und dem Zweckverband Fernwasserversorgung Mittelmain (FWM). Uffenheim; Würzburg.
- Wasserlieferungsvertrag. (07. Dezember 2010). Wasserlieferungsvertrag zwischen dem Zweckverband Fernwasserversorgung Franken (FWF) und dem Zweckverband Fernwasserversorgung Mittelmain (FWM). Uffenheim, Würzburg.
- wasserrechtliche Bewilligung. (1996). Antrag der FWF Erschließungsgebiet Volkach-Astheim. Kitzingen.
- wasserrechtliche Bewilligung. (1997). Antrag der FWF Erschließungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft. Kitzingen.

- wasserrechtliche Bewilligung. (2006). Antrag der FWF Erschließungsgebiet Uehlfeld I und II. Neustadt a. d. Aisch - Bad Windsheim.
- wasserrechtliche Bewilligung. (2013). Antrag der FWF Erschließungsgebiet Haslach-Matzmannsdorf. Ansbach.
- Werkausschuss. (2004). Werkausschusssitzung am 30.November 2004- 11 Ausbau der Fahrrinne des Mains in den Stauhaltungen Marktbreit und Kitzingen hier: Auswirkungen auf das Erschließungsgebiet Sulzfeld/Marktsteft., (S. 2). Uffenheim.
- Werkausschuss. (2005). Werkausschusssitzung am 07.Juni 2005- 5 Ausbau der Fahrrinne des Mains in den Stauhaltungen Marktbreit und Kitzingen- hier: Auswirkungen auf das Erschließungsgebiet Sulzfeld/Martsteft und Planungsauftrag für die erforderlichen Wasseraufbereitungsmaßnahmen., (S. 2). Uffenheim.
- Werkausschuss. (2010). Werkausschutzsitzung am 10.Mai 2010- 4 Erweiterung Wasserwerk Sulzfeld- Entscheidung über die weitere Vorgehensweise., (S. 3). Uffenheim.
- Werkausschuss. (2015). Werkausschutzsitzung- N6 Nichtöffentlicher Teil FWF-Studie 2040 und Kundendialog., (S. 2).
- Werkausschuss. (2015a). Werkausschusssitzung- 9 Kundenumfrage FWF 2015 und Studie FWF 2040., (S. 2).
- Zimmermann, M. (25. August 2015). Vorlesung 4 - Bewertungsmethoden. Darmstadt, Hessen, Deutschland.
- Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach. (o. J.). *Wasserversorgungsanlagen, CARIX-Verfahren, Nanofiltration*. Abgerufen am 02. Mai 2016 von <http://www.wvg-muehlbach.de/unternehmen/anlagen.html>

## **Anhang 1**

**Lageplan der Trinkwasserschutzzonen** (Landratsamt Kitzingen, 2004, S. 17)





Anlage 7 zur VO des  
Landratsamtes Kitzingen  
vom 27. Feb. 2004  
Kitzingen, den 27. Feb. 2004  
Landratsamt

L.V. *Hahn*  
Hahn  
Stellv. d. Landrätin

Geprüft im wasserrechtl. Verfahren  
- Der amtliche Sachverständige -  
Würzburg, *R. v. B.*  
Wasserwirtschaftsamt  
i. A.

*Popp*

# WASSERSCHUTZZONEN:

- WI BRUNNEN MIT FASSUNGSBEREICH (ZONE I)
- WII ENGERE SCHUTZZONE (ZONE II)
- WIII WEITERE SCHUTZZONE (ZONE III)

Maßstab 1 : 25 000



Der Bearbeiter:  
Koblenz, den 11. März 1998

Der Antragsteller:  
Uffenheim, den 11. März 1998

TECHNOLOGIEBERATUNG  
GRUNDWASSER UND UMWELT GmbH  
Maria Theres 3  
56070 Koblenz  
Telefon (0261) 555-260

TGU GmbH Koblenz

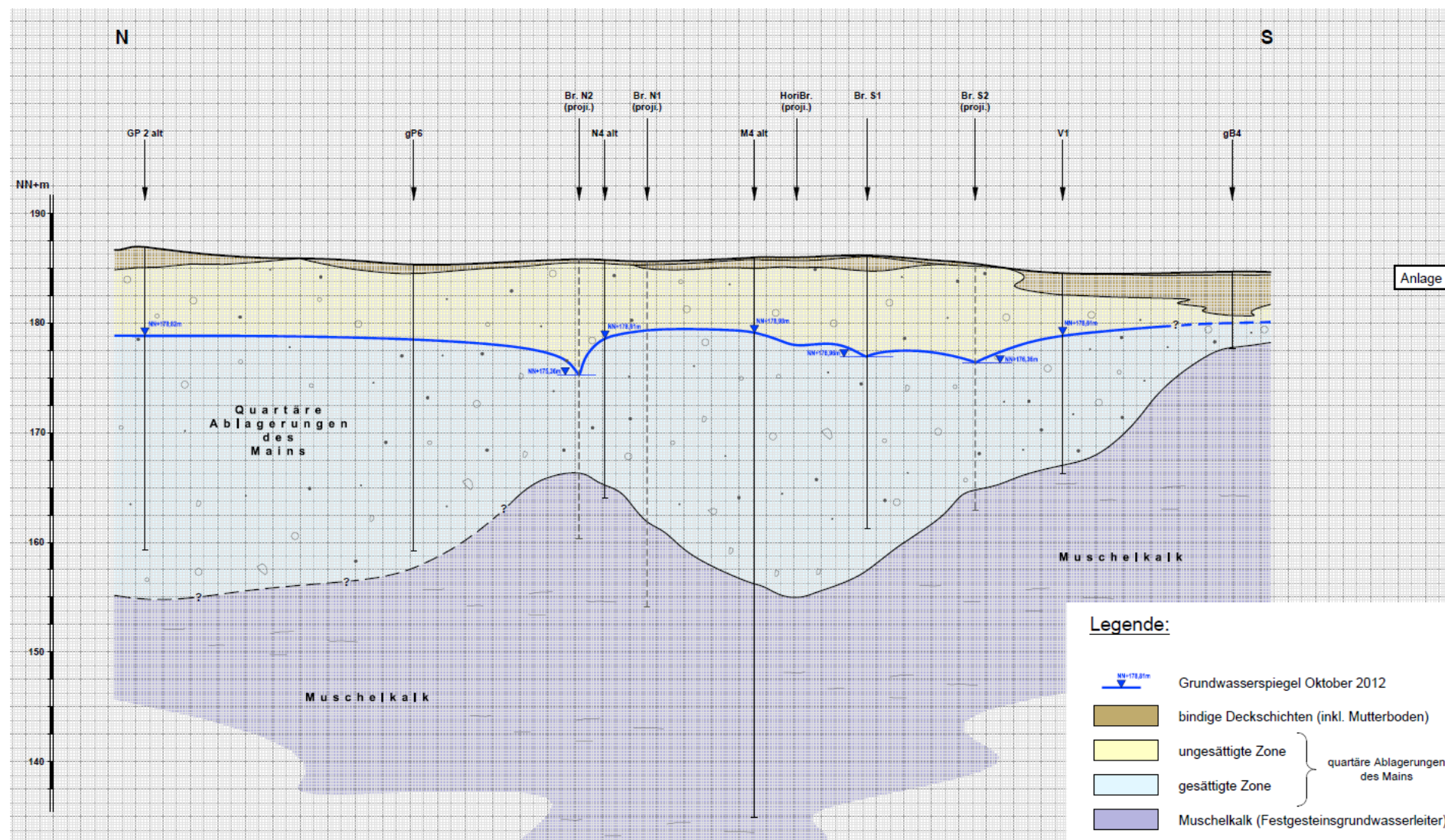
Zweckverband  
Fernwasserversorgung Franken

TECHNOLOGIEBERATUNG  
GRUNDWASSER UND UMWELT  
Beratende Ingenieurgesellschaft mbH 56070 Koblenz



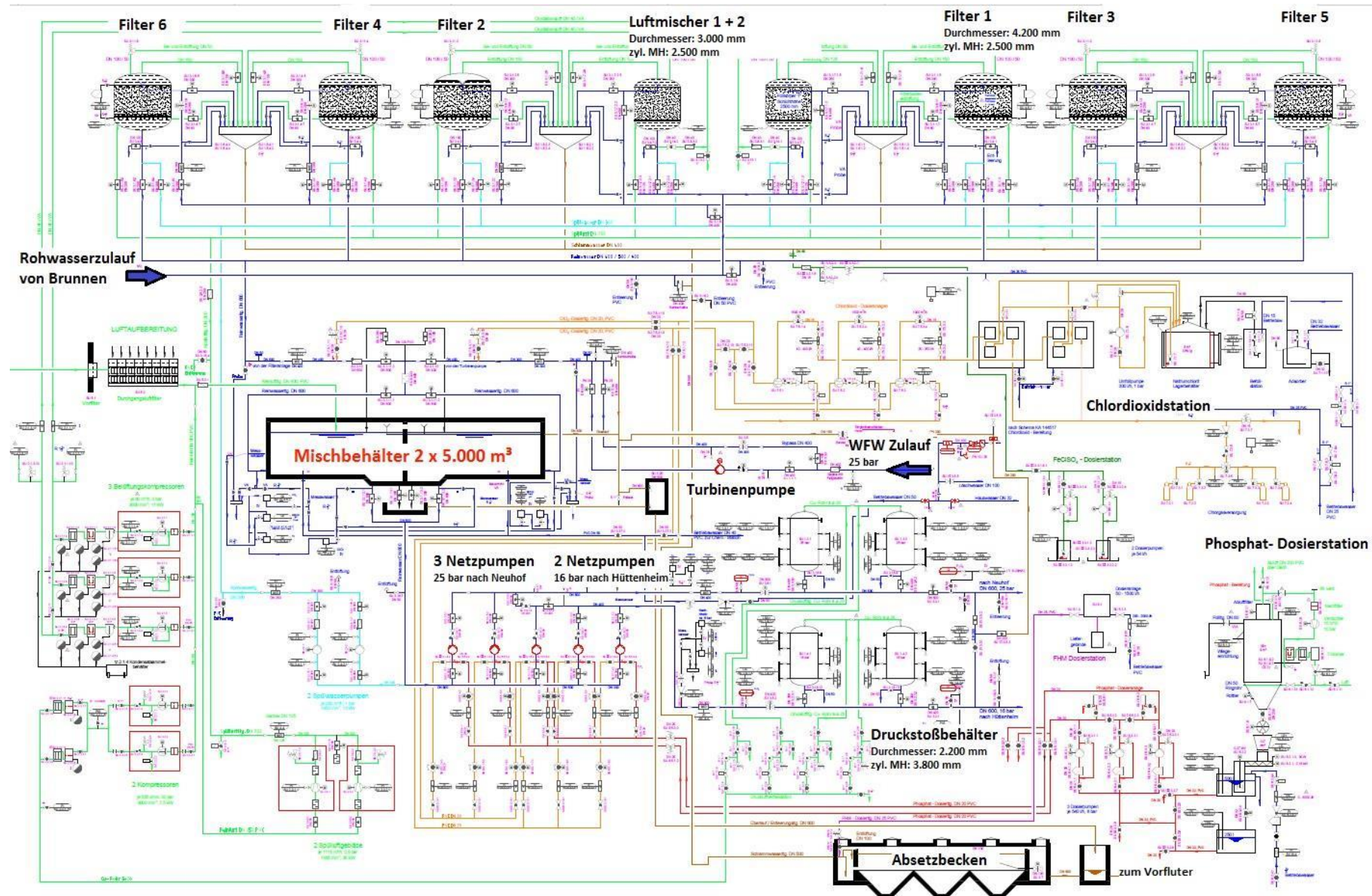
## **Anhang 2**

**Hydrogeologischer Schnitt westlich der Brunnenachse im Bereich der WGA Sulzfeld** (Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH, 2015, S. 46)



## Anhang 3

**R&I Schema WW Sulzfeld** (der Originalplan kann dem angehängten Datenträger entnommen werden)



## **Anhang 4**

### **Wasserbeschaffenheit**



WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S2/N1/N2 vor Oxidator 2						
Parameter	Einheit	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert nach TrinkwV-2001
Geruch, sensorisch	sensorisch	ohne	ohne	ohne	15	
Färbung, visuell	visuell	farblos	farblos	farblos	15	
Geschmack		ohne	ohne	ohne	15	
Wassertemperatur	°C	12,7	11,9	12,1	15	
Sauerstoff	mg/l	2,1	1,3	1,7	15	
Trübung	FNU	0,18	0,09	0,14	15	1,0
Leitfähigkeit 25°C - Best. vor Ort	µS/cm	1190	1110	1168	13	≤ 2790
pH-Wert		7,18	7,11	7,15	15	≥ 6,5 und ≤ 9,5
Calcit-Sättigungs-pH, berechnet		7,10	7,06	7,07	15	
Calcitlösekapazität	mg/l	-4,3	-17,7	-13,1	15	≤ 5
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	1,1	0,9	1,0	15	
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	5,9	5,5	5,7	15	
Hydrogencarbonat	mmol/L	5,8	5,5	5,7	15	
Hydrogencarbonathärte - berechnet	°dH	16,4	15,5	16,1	15	
Calcium	mg/l	178,0	161,0	171,7	15	
Magnesium	mg/l	42,7	37,2	40,9	15	
Gesamthärte - berechnet aus Ca und Mg	°dH	34,4	31,1	33,4	15	
Gesamthärte-ber. als CaCO <sub>3</sub>	mmol/l	6,13	5,53	5,96	15	
Natrium	mg/l	31,0	20,2	24,1	15	≤ 200
Kalium	mg/l	3,3	2,4	2,9	15	
Eisen	mg/l	0,0022	0,0005	0,0010	9	≤ 0,2
Mangan	mg/l	0,0031	<0,0005	<0,0005	15	≤ 0,05
Ammonium	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	15	≤ 0,5
Nitrit	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5
Nitrat	mg/l	40,7	32,0	37,7	15	≤ 50
Chlorid	mg/l	70,6	51,9	58,4	15	≤ 250
Sulfat	mg/l	257	220	242	15	≤ 250
SAK-254	m-1	1,2	0,8	0,9	15	
DOC	mg/l	0,57	0,36	0,42	15	
TOC	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	ohne anormale Veränderungen
Permanganat-Index als O <sub>2</sub>	mg/l	0,76	0,61	0,67	9	
SAK-436	m-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5

WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S1/HM/HS vor Oxidator 2						
Parameter	Einheit	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert nach TrinkwV-2001
Geruch, sensorisch	sensorisch	ohne	ohne	ohne	15	
Färbung, visuell	visuell	farblos	farblos	farblos	15	
Geschmack		ohne	ohne	ohne	15	
Wassertemperatur	°C	12,6	12,0	12,27	15	
Sauerstoff	mg/l	1,4	0,9	1,2	15	
Trübung	FNU	0,18	0,10	0,14	15	1,0
Leitfähigkeit 25°C - Best. vor Ort	µS/cm	1300	1220	1271	13	≤ 2790
pH-Wert		7,20	7,12	7,17	15	≥ 6,5 und ≤ 9,5
Calcit-Sättigungs-pH, berechnet		7,11	7,07	7,09	15	
Calcitlösekapazität	mg/l	-7,3	-15,4	-11,86	15	≤ 5
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	1,04	0,85	0,92	15	
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	5,67	5,51	5,60	15	
Hydrogencarbonat	mmol/L	5,62	5,46	5,55	15	
Hydrogencarbonathärte - berechnet	°dH	15,9	15,4	15,71	15	
Calcium	mg/l	172	160	167,13	15	
Magnesium	mg/l	43,1	39,8	41,79	15	
Gesamthärte - berechnet aus Ca und Mg	°dH	33,9	31,5	32,99	15	
Gesamthärte-ber. als CaCO <sub>3</sub>	mmol/l	6,04	5,62	5,88	15	
Natrium	mg/l	49,6	41,1	45,88	15	≤ 200
Kalium	mg/l	4,2	3,4	3,92	15	
Eisen	mg/l	0,0062	0,0006	0,0014	11	≤ 0,2
Mangan	mg/l	0,0115	0,0017	0,0068	15	≤ 0,05
Ammonium	mg/l	0,01	<0,01	<0,01	15	≤ 0,5
Nitrit	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5
Nitrat	mg/l	39,8	33,0	37,2	15	≤ 50
Chlorid	mg/l	93,7	83,9	89,41	15	≤ 250
Sulfat	mg/l	256	235	246	15	≤ 250
SAK-254	m-1	1,2	1,0	1,06	15	
DOC	mg/l	0,54	0,42	0,48	15	
TOC	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	ohne anormale Veränderungen
Permanganat-Index als O <sub>2</sub>	mg/l	0,86	0,61	0,76	8	
SAK-436	m-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5

WW Sulzfeld, Reinwasser Filter 1-6						
Parameter	Einheit	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert nach TrinkwV-2001
Geruch, sensorisch	sensorisch	ohne	ohne	ohne	27	
Färbung, visuell	visuell	farblos	farblos	farblos	27	
Geschmack		ohne	ohne	ohne	27	
Wassertemperatur	°C	12,8	11,9	12,3	27	
Sauerstoff	mg/l	9,3	6,9	8,4	27	
Trübung	FNU	0,18	0,09	0,14	27	1,0
Leitfähigkeit 25°C - Best. vor Ort	µS/cm	1300	1110	1221	25	≤ 2790
pH-Wert		7,26	7,17	7,22	27	≥ 6,5 und ≤ 9,5
Calcit-Sättigungs-pH, berechnet		7,1	7,1	7,1	27	
Calcitlösekapazität	mg/l	-14,6	-25,0	-18,8	27	≤ 5
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	0,9	0,8	0,8	27	
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	5,8	5,5	5,7	27	
Hydrogencarbonat	mmol/L	5,8	5,4	5,6	27	
Hydrogencarbonathärte - berechnet	°dH	16,3	15,4	15,8	27	
Calcium	mg/l	175,0	159,0	168,4	27	
Magnesium	mg/l	43,0	36,3	41,2	27	
Gesamthärte - berechnet aus Ca und Mg	°dH	34,2	30,9	33,0	27	
Gesamthärte-ber. als CaCO <sub>3</sub>	mmol/l	6,10	5,51	5,89	27	
Natrium	mg/l	49,6	19,0	35,5	27	≤ 200
Kalium	mg/l	4,2	2,4	3,5	27	
Eisen	mg/l	0,0014	<0,0005	<0,0005	27	≤ 0,2
Mangan	mg/l	0,0015	<0,0005	<0,0005	27	≤ 0,05
Ammonium	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	27	≤ 0,5
Nitrit	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5
Nitrat	mg/l	41,8	31,9	37,0	27	≤ 50
Chlorid	mg/l	93,5	48,5	74,8	27	≤ 250
Sulfat	mg/l	<b>258,0</b>	206,0	242,5	27	≤ 250
SAK-254	m-1	1,3	0,8	1,0	27	
DOC	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	
TOC	mg/l	0,53	0,34	0,44	27	ohne anormale Veränderungen
Permanganat-Index als O <sub>2</sub>	mg/l	0,83	0,57	0,70	18	
SAK-436	m-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5

WW Sulzfeld, Einlauf WWF						
Parameter	Einheit	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert nach TrinkwV-2001
Geruch, sensorisch	sensorisch	ohne	ohne	ohne	23	
Färbung, visuell	visuell	farblos	farblos	farblos	23	
Geschmack		ohne	ohne	ohne	23	
Wassertemperatur	°C	13,5	9,4	11,4	23	
Sauerstoff	mg/l	10,6	8,5	9,5	23	
Trübung	FNU	0,17	0,09	0,13	23	1,0
Leitfähigkeit 25°C - Best. vor Ort	µS/cm	527,0	433,0	483,1	21	≤ 2790
pH-Wert		7,78	7,57	7,68	23	≥ 6,5 und ≤ 9,5
Calcit-Sättigungs-pH, berechnet		7,6	7,4	7,5	23	
Calcitlösekapazität	mg/l	-4,8	-13,8	-11,3	23	≤ 5
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	0,3	0,2	0,2	23	
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	4,7	3,8	4,3	23	
Hydrogencarbonat	mmol/L	4,7	3,8	4,3	23	
Hydrogencarbonathärte - berechnet	°dH	13,2	10,6	12,2	23	
Calcium	mg/l	73,9	58,2	66,6	23	
Magnesium	mg/l	20,2	15,6	18,0	23	
Gesamthärte - berechnet aus Ca und Mg	°dH	14,9	11,9	13,4	23	
Gesamthärte-ber. als CaCO <sub>3</sub>	mmol/l	2,66	2,12	2,40	23	
Natrium	mg/l	10,3	7,1	9,0	23	≤ 200
Kalium	mg/l	2,3	1,3	1,8	23	
Eisen	mg/l	0,0031	<0,0005	0,0012	23	≤ 0,2
Mangan	mg/l	0,0018	<0,0005	<0,0005	23	≤ 0,05
Ammonium	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	23	≤ 0,5
Nitrit	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5
Nitrat	mg/l	9,5	4,0	5,97	23	≤ 50
Chlorid	mg/l	16,7	10,6	13,3	23	≤ 250
Sulfat	mg/l	24,9	17,7	20,8	23	≤ 250
SAK-254	m-1	1,4	0,8	1,1	23	
DOC	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	0	
TOC	mg/l	0,62	0,44	0,52	23	ohne anormale Veränderungen
Permanganat-Index als O <sub>2</sub>	mg/l	0,80	0,58	0,68	14	
SAK-436	m-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5

WW Sulzfeld nach Saugbehälter						
Parameter	Einheit	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert nach TrinkwV-2001
Geruch, sensorisch	sensorisch	ohne	ohne	ohne	4	
Färbung, visuell	visuell	farblos	farblos	farblos	4	
Geschmack		ohne	ohne	ohne	4	
Wassertemperatur	°C	13,4	12,3	13,0	4	
Sauerstoff	mg/l	9,2	8,2	8,7	4	
Trübung	FNU	0,21	0,17	0,18	4	1,0
Leitfähigkeit 25°C - Best. vor Ort	µS/cm	848	794	826	4	≤ 2790
pH-Wert		7,39	7,34	7,37	4	≥ 6,5 und ≤ 9,5
Calcit-Sättigungs-pH, berechnet		7,28	7,23	7,25	4	
Calcitlösekapazität	mg/l	-9,4	-13,6	-11,8	4	≤ 5
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	0,7	0,4	0,5	4	
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	5,1	4,7	4,9	4	
Hydrogencarbonat	mmol/L	5,03	4,64	4,88	4	
Hydrogencarbonathärte - berechnet	°dH	14,2	13,1	13,8	4	
Calcium	mg/l	114,0	104,0	110,5	4	
Magnesium	mg/l	28,8	26,8	27,7	4	
Gesamthärte - berechnet aus Ca und Mg	°dH	22,4	20,8	21,9	4	
Gesamthärte-ber. als CaCO <sub>3</sub>	mmol/l	3,99	3,71	3,90	4	
Natrium	mg/l	24,4	19,4	22,0	4	≤ 200
Kalium	mg/l	2,6	2,3	2,5	4	
Eisen	mg/l	0,0021	<0,0005	0,00053	4	≤ 0,2
Mangan	mg/l	0,0009	0,0007	0,00078	4	≤ 0,05
Ammonium	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	4	≤ 0,5
Nitrit	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	4	≤ 0,5
Nitrat	mg/l	18,9	18,1	18,5	4	≤ 50
Chlorid	mg/l	52,1	39,0	44,3	4	≤ 250
Sulfat	mg/l	127,0	118,0	122,3	4	≤ 250
SAK-254	m-1	1,0	0,9	1,0	4	
DOC	mg/L	n.b.	n.b.	n.b.	0	
TOC	mg/l	0,48	0,45	0,46	4	ohne anormale Veränderungen
Permanganat-Index als O <sub>2</sub>	mg/l	0,64	0,58	0,62	4	
SAK-436	m-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	≤ 0,5



## **Anhang 5**

### **Mikrobiologische Parameter**

WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S2/N1/N2 vor Oxidator 2						
Parameter	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert	eingehalten
E.coli (100 mL)-1	0	0	0	62	0	ja
Enterokokken (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Pseudomonas aerug. (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Coliforme Bakterien (100 mL)-1	1	0	0,02	62	0	nein
Clostridium perfringens (100 mL)-1	0	0	0	19	0	ja
Koloniezahl 22°C	2	0	0,15	62	<=100/<=20	ja
Koloniezahl 36°C	3	0	0,13	62	<=100	ja

WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S1/HW/HS vor Oxidator 2						
Parameter	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert	eingehalten
E.coli (100 mL)-1	0	0	0	61	0	ja
Enterokokken (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Pseudomonas aerug. (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
coliforme Bakterien (100 mL)-1	0	0	0	61	0	ja
Clostridium perfringens (100 mL)-1	0	0	0	23	0	ja
Koloniezahl 22 °C	9	0	0,3	61	<=100/<=20	ja
Koloniezahl 36°C	2	0	0,1	61	<=100	ja

WW Sulzfeld, Reinwasser Filter 1-6						
Parameter	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert	eingehalten
E.coli (100 mL)-1	0	0	0	121	0	ja
Enterokokken (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Pseudomonas aerug. (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Coliforme Bakterien (100 mL)-1	1	0	0,01	121	0	nein
Clostridium perfringens (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Koloniezahl 22°C	2	0	0,2	121	<=100/<=20	ja
Koloniezahl 36°C	4	0	0,2	121	<=100	ja

WW Sulzfeld, nach Saugbehälter - Förderung zum HB Neuhof						
Parameter	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert	eingehalten
E.coli (100 mL)-1	0	0	0	4	0	ja
Enterokokken (100 mL)-1	0	0	0	4	0	ja
Pseudomonas aerug. (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Coliforme Bakterien (100 mL)-1	0	0	0	4	0	ja
Clostridium perfringens (100 mL)-1	0	0	0	4	0	ja
Koloniezahl 22°C	0	0	0	4	<=100/<=20	ja
Koloniezahl 36°C	0	0	0	4	<=100	ja

WW Sulzfeld, Einlauf WFW						
Parameter	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	Grenzwert	eingehalten
E.coli (100 mL)-1	0	0	0	30	0	ja
Enterokokken (100 mL)-1	0	0	0	2	0	ja
Pseudomonas aerug. (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	-
Coliforme Bakterien (100 mL)-1	0	0	0	30	0	ja
Clostridium perfringens (100 mL)-1	n.b.	n.b.	n.b.	0	0	ja
Koloniezahl 22°C	3	0	0,23	30	<=100/<=20	ja
Koloniezahl 36°C	18	0	0,97	30	<=100	ja

## **Anhang 6**

**Korrosionschemische Berechnung gemäß DIN EN 12502 und  
DIN 50930-6**

<b>Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe nach DIN EN 12502</b>							
<b>WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S2/N1/N2 vor Oxidator 2</b>							
Parameter			Max	Min	Mittelwert		Mx [g/mol]
pH-Wert			7,18	7,11	7,15		
Säurekapazität	$K_{S\ 4,3}$	mmol/L	5,85	5,53	5,74		
gelöster Sauerstoff	$O_2$	mg/L	2,10	1,30	1,68		
Chlorid- Ionen	$Cl^-$	mg/L	70,60	51,90	58,36		35,453
Nitrat- Ionen	$NO_3^-$	mg/L	40,70	32,00	37,68		62,004
Sulfat- Ionen	$SO_4^{2-}$	mg/L	257,00	220,00	242,47		96,061
Calcium- Ionen	$Ca^{2+}$	mg/L	178,00	161,00	171,73		40,078
<b>DIN EN 12502-2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen</b>							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(HCO_3^-) > 1,0$	mmol/L	5,80	5,48	5,69	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist gering, wenn	$pH > 7,0$		7,18	7,11	7,15	gering	
	$c(HCO_3^-) > 1,5$	mmol/L	5,80	5,48	5,69	gering	
	$S > 1,5$		2,17	2,39	2,25	gering	
<b>DIN EN 12502-3: Einflussfaktoren für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe</b>							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist hoch, wenn und unwahrscheinlich, wenn	$S_1 > 3,0$		1,38	1,20	1,28	gering	
	$S_1 < 0,5$		1,38	1,20	1,28	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist gering, wenn	$c(HCO_3^-) > 2,0$	mmol/L	5,80	5,48	5,69	gering	
	$c(Ca^{2+}) > 20$	mg/L	178,00	161,00	171,73	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der selektiven Korrosion ist gering, wenn	$S_2 < 1$ oder $> 3$		11,19	11,71	11,02	gering	
	$c(NO_3^-) < 18,6$	mg/L	<b>40,70</b>	<b>32,00</b>	<b>37,68</b>	<b>hoch</b>	
<b>DIN EN 12502-4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle</b>							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist hoch, wenn	$c(Cl^-) > 213$	mg/L	70,60	51,90	58,36	gering	
<b>DIN EN 12502-5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle</b>							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(O_2) > 3,2$	mg/L	<b>2,10</b>	<b>1,30</b>	<b>1,68</b>	<b>hoch</b>	
	$pH > 7$		7,18	7,11	7,15	gering	
	$c(HCO_3^-) > 2,0$	mmol/L	5,80	5,48	5,69	gering	
	$c(Ca^{2+}) > 40$	mg/L	178,00	161,00	171,73	gering	
<b>Einsatzbereiche von Werkstoffen nach DIN 50930_6</b>							
Plausibilitätsprüfung	Kriterien		Max	Min	Mittelwert	Anzahl	eingehalten
Ladungsbilanz	$\frac{\sum Kationen - \sum Anionen}{0,5 * (\sum Kationen + \sum Anionen)} < 5 \%$		1,81	-1,32	0,55	15	ja
Werkstoff	Kennwerte		Max	Min	Mittelwert		
Kupfer	pH-Wert	$> 7,4$	7,18	7,11	7,15	15	nein
oder	pH-Wert	$7,0 \leq pH < 7,4$	7,18	7,11	7,15	15	(ja)
	und TOC	$\leq 1,5$ mg/L	n.b.	n.b.	n.b.	15	
schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	$K_{B\ 8,2}$	$\leq 0,20$ mmol/L	<b>1,07</b>	<b>0,9</b>	<b>0,97</b>	15	nein
	$S_1$	$< 1$	<b>1,38</b>	<b>1,20</b>	<b>1,28</b>		
unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe	$c(O_2)$	$> 3,2$ mg/L	<b>2,10</b>	<b>1,30</b>	<b>1,68</b>	15	nein/ja
	pH	$> 7$	7,18	7,11	7,15	15	
	$K_{S\ 4,3}$	$> 2,0$ mmol/L	5,85	5,53	5,74	15	
	$c(Ca^{2+})$	$> 40,1$ mg/L	178,00	161,00	171,73	15	

**Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe nach DIN EN 12502****WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S1/HM/HS vor Oxidator 2**

Parameter			Max	Min	Mittelwert	Mx [g/mol]	
pH-Wert			7,20	7,12	7,17		
Säurekapazität	K <sub>S 4,3</sub>	mmol/L	5,67	5,51	5,60		
gelöster Sauerstoff	O <sub>2</sub>	mg/L	1,40	0,90	1,23		
Chlorid- Ionen	Cl <sup>-</sup>	mg/L	93,70	83,90	89,41	35,453	
Nitrat- Ionen	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	39,80	33,00	37,19	62,004	
Sulfat- Ionen	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	256,00	235,00	246,00	96,061	
Calcium- Ionen	Ca <sup>2+</sup>	mg/L	172,00	160,00	167,13	40,078	
DIN EN 12502-2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	c(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) > 1,0	mmol/L	5,62	5,46	5,55	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist gering, wenn	pH > 7,0		7,20	7,12	7,17	gering	
	c(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) > 1,5	mmol/L	5,62	5,46	5,55	gering	
	S > 1,5		2,11	2,23	2,17	gering	
DIN EN 12502-3: Einflussfaktoren für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist hoch, wenn und unwahrscheinlich, wenn	S <sub>1</sub> > 3,0		1,53	1,43	1,48	gering	
	S <sub>1</sub> < 0,5		1,53	1,43	1,48	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist gering, wenn	c(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) > 2,0	mmol/L	5,62	5,46	5,55	gering	
	c(Ca <sup>2+</sup> ) > 20	mg/L	172,00	160,00	167,13	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der selektiven Korrosion ist gering, wenn	S <sub>2</sub> < 1 oder > 3		12,42	13,64	12,74	gering	
	c(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) < 18,6	mg/L	39,80	33,00	37,19	hoch	
DIN EN 12502-4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist hoch, wenn	c(Cl <sup>-</sup> ) > 213	mg/L	93,70	83,90	89,41	gering	
DIN EN 12502-5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	c(O <sub>2</sub> ) > 3,2	mg/L	1,40	0,90	1,23	hoch	
	pH > 7		7,20	7,12	7,17	gering	
	c(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) > 2,0	mmol/L	5,62	5,46	5,55	gering	
	c(Ca <sup>2+</sup> ) > 40	mg/L	172,00	160,00	167,13	gering	
Einsatzbereiche von Werkstoffen nach DIN 50930 6							
Plausibilitätsprüfung	Kriterien		Max	Min	Mittelwert	Anzahl	eingehalten
Ladungsbilanz	$\frac{\sum \text{Kationen} - \sum \text{Anionen}}{0,5 * (\sum \text{Kationen} + \sum \text{Anionen})} < 5 \%$		2,03	-1,52	0,55	15	ja
Werkstoff	Kennwerte		Max	Min	Mittelwert		
Kupfer	pH-Wert	> 7,4	7,20	7,12	7,17	15	nein
oder	pH-Wert	7,0 ≤ pH < 7,4	7,20	7,12	7,17	15	(ja)
	und TOC	≤ 1,5 mg/L	n.b.	n.b.	n.b.		
schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	K <sub>B 8,2</sub>	≤ 0,20 mmol/L	1,04	0,85	0,92	15	nein
	S <sub>1</sub>	< 1	1,53	1,43	1,48		
unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe	c(O <sub>2</sub> )	> 3,2 mg/L	1,40	0,90	1,23	15	nein/ja
	pH	> 7	7,20	7,12	7,17	15	
	K <sub>S 4,3</sub>	> 2,0 mmol/L	5,67	5,51	5,60	15	
	c(Ca <sup>2+</sup> )	> 40,1 mg/L	172,00	160,00	167,13	15	

**Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe nach DIN EN 12502**

WW Sulzfeld, Reinwasser Filter 1-6							
Parameter			Max	Min	Mittelwert		Mx [g/mol]
pH-Wert			7,26	7,17	7,22		
Säurekapazität	$K_{S\ 4,3}$	mmol/L	5,83	5,49	5,65		
gelöster Sauerstoff	$O_2$	mg/L	9,30	6,90	8,39		
Chlorid- Ionen	$Cl^-$	mg/L	93,50	48,50	74,77		35,453
Nitrat- Ionen	$NO_3^-$	mg/L	41,80	31,90	36,99		62,004
Sulfat- Ionen	$SO_4^{2-}$	mg/L	258,00	206,00	242,48		96,061
Calcium- Ionen	$Ca^{2+}$	mg/L	175,00	159,00	168,41		40,078
DIN EN 12502-2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(HCO_3^-) > 1,0$	mmol/L	5,78	5,44	5,60	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist gering, wenn	$pH > 7,0$ $c(HCO_3^-) > 1,5$ $S > 1,5$	mmol/L	7,26 5,78 2,15	7,17 5,44 2,54	7,22 5,60 2,22	gering gering gering	
DIN EN 12502-3: Einflussfaktoren für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist hoch, wenn und unwahrscheinlich, wenn	$S_1 > 3,0$ $S_1 < 0,5$		1,50 1,50	1,13 1,13	1,38 1,38	gering gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist gering, wenn	$c(HCO_3^-) > 2,0$ $c(Ca^{2+}) > 20$	mmol/L mg/L	5,78 175,00	5,44 159,00	5,60 168,41	gering gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der selektiven Korrosion ist gering, wenn	$S_2 < 1$ oder $> 3$ $c(NO_3^-) < 18,6$		11,88 41,80	11,00 31,90	12,00 36,99	gering hoch	
DIN EN 12502-4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist hoch, wenn	$c(Cl^-) > 213$	mg/L	93,50	48,50	74,77	gering	
DIN EN 12502-5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(O_2) > 3,2$ $pH > 7$ $c(HCO_3^-) > 2,0$ $c(Ca^{2+}) > 40$	mg/L  mmol/L mg/L	9,30 7,26 5,78 175,00	6,90 7,17 5,44 159,00	8,39 7,22 5,60 168,41	gering gering gering gering	
Einsatzbereiche von Werkstoffen nach DIN 50930 6							
Plausibilitätsprüfung	Kriterien		Max	Min	Mittelwert	Anzahl	eingehalten
Ladungsbilanz	$\frac{\sum Kationen - \sum Anionen}{0,5 * (\sum Kationen + \sum Anionen)} < 5\%$		2,20	-1,61	0,59	27	ja
Werkstoff	Kennwerte		Max	Min	Mittelwert		
Kupfer	pH-Wert	$> 7,4$	7,26	7,17	7,22	27	nein
oder	pH-Wert	$7,0 \leq pH < 7,4$	7,26	7,17	7,22	27	ja
	und TOC	$\leq 1,5\text{ mg/L}$	0,53	0,34	0,44	27	
schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	$K_{8,2}$	$\leq 0,20\text{ mmol/L}$	0,93	0,75	0,82	27	nein
	$S_1$	$< 1$	1,50	1,13	1,38		
unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe	$c(O_2)$	$> 3,2\text{ mg/L}$	5,78	5,44	5,60	27	ja
	pH	$> 7$	7,26	7,17	7,22	27	
	$K_{S\ 4,3}$	$> 2,0\text{ mmol/L}$	5,83	5,49	5,65	27	
	$c(Ca^{2+})$	$> 40,1\text{ mg/L}$	175,00	159,00	168,41	27	

Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe nach DIN EN 12502							
Einlauf WFW							
Parameter			Max	Min	Mittelwert		Mx [g/mol]
pH-Wert			7,78	7,57	7,68		
Säurekapazität	$K_{S\ 4,3}$	mmol/L	4,70	3,80	4,35		
gelöster Sauerstoff	$O_2$	mg/L	10,60	8,50	9,51		
Chlorid- Ionen	$Cl^-$	mg/L	16,70	10,60	13,32		35,453
Nitrat- Ionen	$NO_3^-$	mg/L	9,50	4,00	5,97		62,004
Sulfat- Ionen	$SO_4^{2-}$	mg/L	24,90	17,70	20,83		96,061
Calcium- Ionen	$Ca^{2+}$	mg/L	73,90	58,20	66,56		40,078
DIN EN 12502-2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(HCO_3^-) > 1,0$	mmol/L	4,65	3,75	4,30	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist gering,	$pH > 7,0$		7,78	7,57	7,68	gering	
	$c(HCO_3^-) > 1,5$	mmol/L	4,65	3,75	4,30	gering	
	$S > 1,5$		17,94	20,35	19,82	gering	
DIN EN 12502-3: Einflussfaktoren für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist hoch, wenn und unwahrscheinlich,	$S_1 > 3,0$		0,25	0,20	0,21	gering	
	$S_1 < 0,5$		0,25	0,20	0,21	unwahrscheinlich	
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist gering,	$c(HCO_3^-) > 2,0$	mmol/L	4,65	3,75	4,30	gering	
	$c(Ca^{2+}) > 20$	mg/L	73,90	58,20	66,56	gering	
Korrosionswahrscheinlichkeit der selektiven Korrosion ist gering, wenn	$S_2 < 1$ oder $> 3$		6,46	10,35	8,41	gering	
	$c(NO_3^-) < 18,6$	mg/L	9,50	4,00	5,97	gering	
DIN EN 12502-4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle							
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist hoch, wenn	$c(Cl^-) > 213$	mg/L	16,70	10,60	13,32	gering	
DIN EN 12502-5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle							
Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(O_2) > 3,2$	mg/L	10,60	8,50	9,51	gering	
	$pH > 7$		7,78	7,57	7,68	gering	
	$c(HCO_3^-) > 2,0$	mmol/L	4,65	3,75	4,30	gering	
	$c(Ca^{2+}) > 40$	mg/L	73,90	58,20	66,56	gering	
Einsatzbereiche von Werkstoffen nach DIN 50930 6							
Plausibilitätsprüfung	Kriterien		Max	Min	Mittelwert	Anzahl	eingehalten
Ladungsbilanz	$\frac{\sum Kationen - \sum Anionen}{0,5 * (\sum Kationen + \sum Anionen)} < 5\%$		2,45	-0,42	0,68	23	ja
Werkstoff	Kennwerte		Max	Min	Mittelwert		
Kupfer	pH-Wert	$> 7,4$	7,78	7,57	7,68	23	ja
oder	pH-Wert	$7,0 \leq pH < 7,4$	7,78	7,57	7,68	23	ja
	und TOC	$\leq 1,5\text{ mg/L}$	0,62	0,44	0,52	23	ja
schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	$K_{B\ 8,2}$	$\leq 0,20\text{ mmol/L}$	0,33	0,15	0,22	23	nein/ja
	$S_1$	$< 1$	0,25	0,20	0,21		
unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe	$c(O_2)$	$> 3,2\text{ mg/L}$	10,60	8,50	9,51	23	ja
	pH	$> 7$	7,78	7,57	7,68	23	
	$K_{S\ 4,3}$	$> 2,0\text{ mmol/L}$	4,70	3,80	4,35	23	
	$c(Ca^{2+})$	$> 40,1\text{ mg/L}$	73,90	58,20	66,56	23	

**Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe nach DIN EN 12502****WW Sulzfeld, nach Saugbehälter**

Parameter			Max	Min	Mittelwert		Mx [g/mol]
pH-Wert			7,39	7,34	7,37		
Säurekapazität	$K_{S\ 4,3}$	mmol/L	5,08	4,69	4,93		
gelöster Sauerstoff	$O_2$	mg/L	9,20	8,20	8,70		
Chlorid- Ionen	$Cl^-$	mg/L	52,10	39,00	44,25		35,453
Nitrat- Ionen	$NO_3^-$	mg/L	18,90	18,10	18,45		62,004
Sulfat- Ionen	$SO_4^{2-}$	mg/L	127,00	118,00	122,25		96,061
Calcium- Ionen	$Ca^{2+}$	mg/L	114,00	104,00	110,50		40,078

**DIN EN 12502-2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen**

Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(HCO_3^-) > 1,0$	mmol/L	5,03	4,64	4,88	gering
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in	$pH > 7,0$		7,39	7,34	7,37	gering
erwärmten Wasser ist gering,	$c(HCO_3^-) > 1,5$	mmol/L	5,03	4,64	4,88	gering
	$S > 1,5$		3,80	3,78	3,83	gering

**DIN EN 12502-3: Einflussfaktoren für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe**

Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion in erwärmten Wasser ist hoch, wenn und unwahrscheinlich,	$S_1 > 3,0$		0,88	0,83	0,84	gering
	$S_1 < 0,5$		0,88	0,83	0,84	gering
Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist gering,	$c(HCO_3^-) > 2,0$	mmol/L	5,03	4,64	4,88	gering
	$c(Ca^{2+}) > 20$	mg/L	114,00	104,00	110,50	gering
Korrosionswahrscheinlichkeit der selektiven Korrosion ist gering, wenn	$S_2 < 1$ oder $> 3$		13,50	12,18	12,75	gering
	$c(NO_3^-) < 18,6$	mg/L	18,90	18,10	18,45	hoch/gering

**DIN EN 12502-4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle**

Korrosionswahrscheinlichkeit der Lochkorrosion ist hoch, wenn	$c(Cl^-) > 213$	mg/L	52,10	39,00	44,25	gering
---	-----------------	------	-------	-------	-------	--------

**DIN EN 12502-5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle**

Korrosionswahrscheinlichkeit der gleichmäßigen Flächenkorrosion ist gering, wenn	$c(O_2) > 3,2$	mg/L	9,20	8,20	8,70	gering
	$pH > 7$		7,39	7,34	7,37	gering
	$c(HCO_3^-) > 2,0$	mmol/L	5,03	4,64	4,88	gering
	$c(Ca^{2+}) > 40$	mg/L	114,00	104,00	110,50	gering

**Einsatzbereiche von Werkstoffen nach DIN 50930 6**

Plausibilitätsprüfung	Kriterien	Max	Min	Mittelwert	Anzahl	eingehalten	
Ladungsbilanz	$\frac{\sum Kationen - \sum Anionen}{0,5 * (\sum Kationen + \sum Anionen)} < 5 \%$	0,04	-4,11	-1,69	4	ja	
Werkstoff	Kennwerte	Max	Min	Mittelwert			
Kupfer	pH-Wert	> 7,4	7,39	7,34	7,37	4	nein
oder	pH-Wert	$7,0 \leq pH < 7,4$	7,39	7,34	7,37	4	ja
	und TOC	$\leq 1,5 \text{ mg/L}$	0,48	0,45	0,46	4	
schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	$K_{88,2}$	$\leq 0,20 \text{ mmol/L}$	0,7	0,44	0,53	4	nein/ja
	$S_1$	< 1	0,88	0,83	0,84		
unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe	$c(O_2)$	> 3,2 mg/L	9,20	8,20	8,70	4	ja
	pH	> 7	7,39	7,34	7,37	4	
	$K_{S\ 4,3}$	> 2,0 mmol/L	5,08	4,69	4,93	4	
	$c(Ca^{2+})$	> 40,1 mg/L	114,00	104,00	110,50	4	



## **Anhang 7**

### **Berechnung der Betonaggressivität gemäß DIN 4030-1 Tabelle 4**

WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S2/N1/N2 vor Oxidator 2								
Parameter		Grenzwert			Max	Min	Mittelwert	Anzahl
		schwach	stark	sehr stark				
pH- Wert		≤ 6,5	< 5,5	< 4,5	7,18	7,11	7,15	15
kalklösende Kohlensäure (CO <sub>2</sub> )	mg/L	≥ 15	> 40	> 100	-1,89	-7,79	-5,75	15
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	≥ 15	> 30	> 604	<0,01	<0,01	<0,01	15
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	≥ 300	> 1000	> 3000	42,7	37,2	40,93	15
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	≥ <b>200</b>	> 600	> 3000	<b>257</b>	<b>220</b>	<b>242,47</b>	15

WW Sulzfeld, Rohwasser Brunnen S1/HM/HS vor Oxidator 2								
Parameter		Grenzwert			Max	Min	Mittelwert	Anzahl
		schwach	stark	sehr stark				
pH- Wert		≤ 6,5	< 5,5	< 4,5	7,2	7,12	7,17	15
kalklösende Kohlensäure (CO <sub>2</sub> )	mg/L	≥ 15	> 40	> 100	-3,21	-6,78	-5,22	15
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	≥ 15	> 30	> 604	0,01	<0,01	<0,01	15
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	≥ 300	> 1000	> 3000	43,1	39,8	41,79	15
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	≥ <b>200</b>	> 600	> 3000	<b>256</b>	<b>235</b>	<b>246</b>	15

WW Sulzfeld nach Saugbehälter- Förderung zum HB Neuhof								
Parameter		Grenzwert			Max	Min	Mittelwert	Anzahl
		schwach	stark	sehr stark				
pH- Wert		≤ 6,5	< 5,5	< 4,5	7,39	7,34	7,37	4
kalklösende Kohlensäure (CO <sub>2</sub> )	mg/L	≥ 15	> 40	> 100	-21,37	-30,91	-26,82	4
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	≥ 15	> 30	> 604	<0,01	<0,01	<0,01	4
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	≥ 300	> 1000	> 3000	28,8	26,8	27,73	4
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	≥ 200	> 600	> 3000	127	118	122,25	4

WW Sulzfeld, Einlauf WFW								
Parameter		Grenzwert			Max	Min	Mittelwert	Anzahl
		schwach	stark	sehr stark				
pH- Wert		≤ 6,5	< 5,5	< 4,5	7,78	7,57	7,68	26
kalklösende Kohlensäure (CO <sub>2</sub> )	mg/L	≥ 15	> 40	> 100	-2,11	-6,07	-4,97	26
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	≥ 15	> 30	> 604	< 0,01	< 0,01	< 0,01	26
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	≥ 300	> 1000	> 3000	20,2	15,6	17,99	26
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	≥ 200	> 600	> 3000	24,9	17,7	20,83	26

WW Sulzfeld, Reinwasser Filter 1-6								
Parameter		Grenzwert			Max	Min	Mittelwert	Anzahl
		schwach	stark	sehr stark				
pH- Wert		≤ 6,5	< 5,5	< 4,5	7,26	7,17	7,22	27
kalklösende Kohlensäure (CO <sub>2</sub> )	mg/L	≥ 15	> 40	> 100	-6,42	-11,00	-8,27	27
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	≥ 15	> 30	> 604	<0,01	<0,01	<0,01	27
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	≥ 300	> 1000	> 3000	43	36,3	41,24	27
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	≥ <b>200</b>	> 600	> 3000	<b>258</b>	<b>206</b>	<b>242,48</b>	27

## **Anhang 8**

### **Befund der Rohwasseruntersuchung auf organische Spurenstoffe**

Auftragsanalytik vom 17.05.2010 (Fremdvergabe an das Technologiezentrum Wasser (TZW))				
Messstelle			PW Sulzfeld - Rohwasser HS, S1, HM	PW Sulzfeld - Rohwasser S2, N1, N2
Probe-Nr			2010005778	2010005779
Datum	BG		17.05.2010	17.05.2010
NTA (Nitrilotriacetat)	0,5	µg/L	< BG	< BG
EDTA (Ethyldinitrilotetraacetat)	0,5	µg/L	2,2	1,7
DTPA (Diethylentriaminpentaacetat)	1	µg/L	< BG	< BG
PDTA (1,3-Propylendiamintetraacetat)	1	µg/L	< BG	< BG
ADA (beta-Alanindiacetat)	1	µg/L	< BG	< BG
MGDA (Methylglycindiaceetat)	1	µg/L	< BG	< BG
Ametryn	0,05	µg/L	< BG	< BG
Bromacil	0,03	µg/L	< BG	< BG
Carbetamid	0,1	µg/L	< BG	< BG
Carfentrazon	0,1	µg/L	< BG	< BG
Cyanazin	0,05	µg/L	< BG	< BG
Desmetryn	0,05	µg/L	< BG	< BG
Dimefuron	0,05	µg/L	< BG	< BG
Ethidimuron	0,1	µg/L	< BG	< BG
Lenacil	0,05	µg/L	< BG	< BG
Methabenzthiazuron	0,05	µg/L	< BG	< BG
Metamitron	0,1	µg/L	< BG	< BG
Metobromuron	0,05	µg/L	< BG	< BG
Metoxuron	0,05	µg/L	< BG	< BG
Monolinuron	0,05	µg/L	< BG	< BG
Phenmedipham	0,1	µg/L	< BG	< BG
Prometryn	0,05	µg/L	< BG	< BG
Propazin	0,05	µg/L	< BG	< BG
Desethylsimazin (Metabolit)	0,05	µg/L	< BG	< BG
Terbutryn	0,05	µg/L	< BG	< BG
Triadimefon	0,05	µg/L	< BG	< BG
Triadimenol	0,1	µg/L	< BG	< BG
Tolyfluanid	0,02	µg/L	< BG	< BG
Alachlor	0,05	µg/L	< BG	< BG
Dichlobenil	0,05	µg/L	< BG	< BG
Dichlorbenzamid (Metabolit)	0,05	µg/L	< BG	< BG
Hexazinon	0,05	µg/L	< BG	< BG
Metalaxyl	0,05	µg/L	< BG	< BG
Picolinafen	0,05	µg/L	< BG	< BG
2,4-Dinitrophenol	0,1	µg/L	< BG	< BG
2,4-DB	0,05	µg/L	< BG	< BG
2,4,5-T	0,05	µg/L	< BG	< BG
2,4,5-TP (Fenoprop)	0,05	µg/L	< BG	< BG
Bromoxynil	0,05	µg/L	< BG	< BG
Dicamba	0,05	µg/L	< BG	< BG
Dinoseb	0,05	µg/L	< BG	< BG
Dinoterb	0,05	µg/L	< BG	< BG
DNOC	0,05	µg/L	< BG	< BG
Fluroxypyr	0,05	µg/L	< BG	< BG
Ioxynil	0,05	µg/L	< BG	< BG
Quinmerac	0,05	µg/L	< BG	< BG
Chloridazon	0,02	µg/L	< BG	< BG
Chloridazon-Desphenyl	0,02	µg/L	0,2	0,34

Chloridazon-Metabolit-B1	0,02	µg/L	0,04	0,1
Chlorthalonil	0,01	µg/L	< BG	< BG
Chlorthalonil S-Metabolit	0,01	µg/L	< BG	< BG
Dimethachlor	0,01	µg/L	< BG	< BG
Dimethachlor C-Metabolit	0,01	µg/L	< BG	< BG
Dimethachlor S-Metabolit	0,01	µg/L	< BG	< BG
Metazachlor	0,01	µg/L	< BG	< BG
Metazachlor C-Metabolit	0,01	µg/L	< BG	< BG
Metazachlor S-Metabolit	0,01	µg/L	< BG	< BG
Metazachlor-Metabolit BH 479-9	0,02	µg/L	< BG	< BG
Metazachlor-Metabolit BH 479-11	0,02	µg/L	< BG	< BG
Metazachlor-Metabolit BH 479-12	0,02	µg/L	< BG	< BG
S-Metolachlor	0,01	µg/L	< BG	< BG
S-Metolachlor C-Metabolit	0,01	µg/L	< BG	< BG
S-Metolachlor S -Metabolit	0,01	µg/L	< BG	< BG
Quinmerac-Metabolit BH 518-2	0,02	µg/L	< BG	< BG
N,N-Dimethylsulfamid	0,01	µg/L	1,1	1,3
Amidosulfuron	10	ng/L	< BG	< BG
Bensulfuron-methyl	20	ng/L	< BG	< BG
Chlorsulfuron	10	ng/L	< BG	< BG
Iodosulfuron	50	ng/L	< BG	< BG
Metsulfuron-methyl	10	ng/L	< BG	< BG
Nicosulfuron	10	ng/L	< BG	< BG
Primisulfuron-methyl	10	ng/L	< BG	< BG
Prosulfuron	10	ng/L	< BG	< BG
Thifensulfuron-methyl	10	ng/L	< BG	< BG
Triasulfuron	10	ng/L	< BG	< BG
Triflusulfuron-methyl	10	ng/L	< BG	< BG
Bezafibrat	10	ng/L	< BG	< BG
Carbamazepin	10	ng/L	12	< BG
Clofibrinsäure	10	ng/L	< BG	< BG
Diazepam	10	ng/L	< BG	< BG
Diclofenac	10	ng/L	< BG	< BG
Etofibrat	10	ng/L	< BG	< BG
Fenofibrat	10	ng/L	< BG	< BG
Fenofibrinsäure	10	ng/L	< BG	< BG
Fenoprofen	10	ng/L	< BG	< BG
Gemfibrozil	10	ng/L	< BG	< BG
Ibuprofen	10	ng/L	< BG	< BG
Indomethacin	10	ng/L	< BG	< BG
Ketoprofen	10	ng/L	< BG	< BG
Naproxen	10	ng/L	< BG	< BG
Pentoxifyllin	10	ng/L	< BG	< BG
Phenobarbital	10	ng/L	< BG	< BG
Atenolol	10	ng/L	< BG	< BG
Betaxolol	10	ng/L	< BG	< BG
Bisoprolol	10	ng/L	< BG	< BG
Clenbuterol	10	ng/L	< BG	< BG
Cyclophosphamid	10	ng/L	< BG	< BG
Dimethylaminophenazon	10	ng/L	< BG	< BG
Ifosfamid	10	ng/L	< BG	< BG
Metoprolol	10	ng/L	< BG	< BG
Phenazon	10	ng/L	< BG	< BG
Pindolol	10	ng/L	< BG	< BG
Propranolol	10	ng/L	< BG	< BG
Propyphenazon	10	ng/L	< BG	< BG

Salbutamol	10	ng/L	< BG	< BG
Simvastatin	10	ng/L	< BG	< BG
Sotalol	10	ng/L	< BG	< BG
Terbutalin	10	ng/L	< BG	< BG
Azithromycin	10	ng/L	< BG	< BG
Clarithromycin	10	ng/L	< BG	< BG
Dehydrato-Erythromycin A	10	ng/L	< BG	< BG
Oleandomycin	10	ng/L	< BG	< BG
Roxithromycin	10	ng/L	< BG	< BG
Spiramycin	10	ng/L	< BG	< BG
Tylosin	10	ng/L	< BG	< BG
Sulfadiazin	10	ng/L	< BG	< BG
Sulfadimidin	10	ng/L	< BG	< BG
Sulfamerazin	10	ng/L	< BG	< BG
Sulfamethoxazol	10	ng/L	< BG	< BG
Amoxicillin	20	ng/L	< BG	< BG
Cloxacillin	20	ng/L	< BG	< BG
Dicloxacillin	20	ng/L	< BG	< BG
Virginiamycin	10	ng/L	< BG	< BG
Nafcillin	20	ng/L	< BG	< BG
Oxacillin	20	ng/L	< BG	< BG
Penicillin G	20	ng/L	< BG	< BG
Penicillin V	20	ng/L	< BG	< BG
Chloramphenicol	10	ng/L	< BG	< BG
Clindamycin	10	ng/L	< BG	< BG
Dapson	10	ng/L	< BG	< BG
Furazolidon	10	ng/L	< BG	< BG
Metronidazol	10	ng/L	< BG	< BG
Ronidazol	10	ng/L	< BG	< BG
Trimethoprim	5	ng/L	< BG	< BG
Chlortetracyclin	20	ng/L	< BG	< BG
Doxycyclin	20	ng/L	< BG	< BG
Meclocyclin	20	ng/L	< BG	< BG
Oxytetracyclin	20	ng/L	< BG	< BG
Tetracyclin	20	ng/L	< BG	< BG
Ciprofloxacin	20	ng/L	< BG	< BG
Enoxacin	20	ng/L	< BG	< BG
Enrofloxacin	20	ng/L	< BG	< BG
Norfloxacin	20	ng/L	< BG	< BG
Ofloxacin	20	ng/L	< BG	< BG
Amidotrizoesäure	10	ng/L	58	67
Iohexol	10	ng/L	< BG	< BG
Iomeprol	10	ng/L	< BG	< BG
Iopamidol	10	ng/L	16	11
Iopromid	10	ng/L	< BG	< BG
Iotalaminsäure	10	ng/L	< BG	< BG
Ioxaglinsäure	10	ng/L	< BG	< BG
Ioxithalaminsäure	10	ng/L	< BG	< BG
3-Chloranilin	0,05	µg/L	< BG	< BG
1,2-Dichlorpropan	0,05	µg/L	< BG	< BG

## **Anhang 9**

**Untersuchungsergebnisse von Arzneimittelrückständen in Roh- und Trinkwässern aus oberflächenwasserbeeinflussten Gewinnungsanlagen**

# **Ergebnisübersicht „Sonderuntersuchungsprogramm Arzneimittel 2007/2008“**

Die in der Tabelle angegebenen Werte sind Ergebnisse von Einzelproben zum jeweiligen Messzeitpunkt.

Die Werte entsprechen daher nicht zwangsläufig dem aktuellen Gehalt des jeweiligen Trinkwassers.

Uferfiltratanteil aus	Trinkwasserart	Befund	
		Wirkstoff	Gehalt [µg/l]
Main	Rohwasser aus Grundwasser, nicht aufbereitet	Carbamazepin Sulfamethoxazol Primidon	0,11 0,056 0,026
Main	Mischwasser, aufbereitet	Carbamazepin Amidotrizoesäure	0,077 0,20
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin Sulfamethoxazol Primidon Amidotrizoesäure Iopamidol	0,069 0,023 0,019 0,20 0,12
Regnitz	Mischwasser, aufbereitet	Carbamazepin Amidotrizoesäure Iopamidol	0,066 0,16 0,12
Rezat	Mischwasser, aufbereitet	Carbamazepin Sulfamethoxazol Amidotrizoesäure	0,052 0,019 0,18
Regnitz	Oberflächenwasser, k. A.	Carbamazepin	0,047
Isar	Mischwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,032
Rednitz	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,031
Donau	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,031
Donau	Mischwasser, nicht aufbereitet	Carbamazepin Sulfamethoxazol	0,030 0,021
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,029
Donau / Lech	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,022
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,018
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,018
Donau / Lech	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,016
Traun	Grundwasser, nicht aufbereitet	Carbamazepin Sulfamethoxazol	0,013 0,019
Donau	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,013
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,012
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,012
Weißer Main	Mischwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,011
Roth	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,011
Donau	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,008
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,008
Donau	Grundwasser, k. A.	Carbamazepin	0,007
Main	Grundwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,006
Isar	Mischwasser, aufbereitet	Carbamazepin	0,006



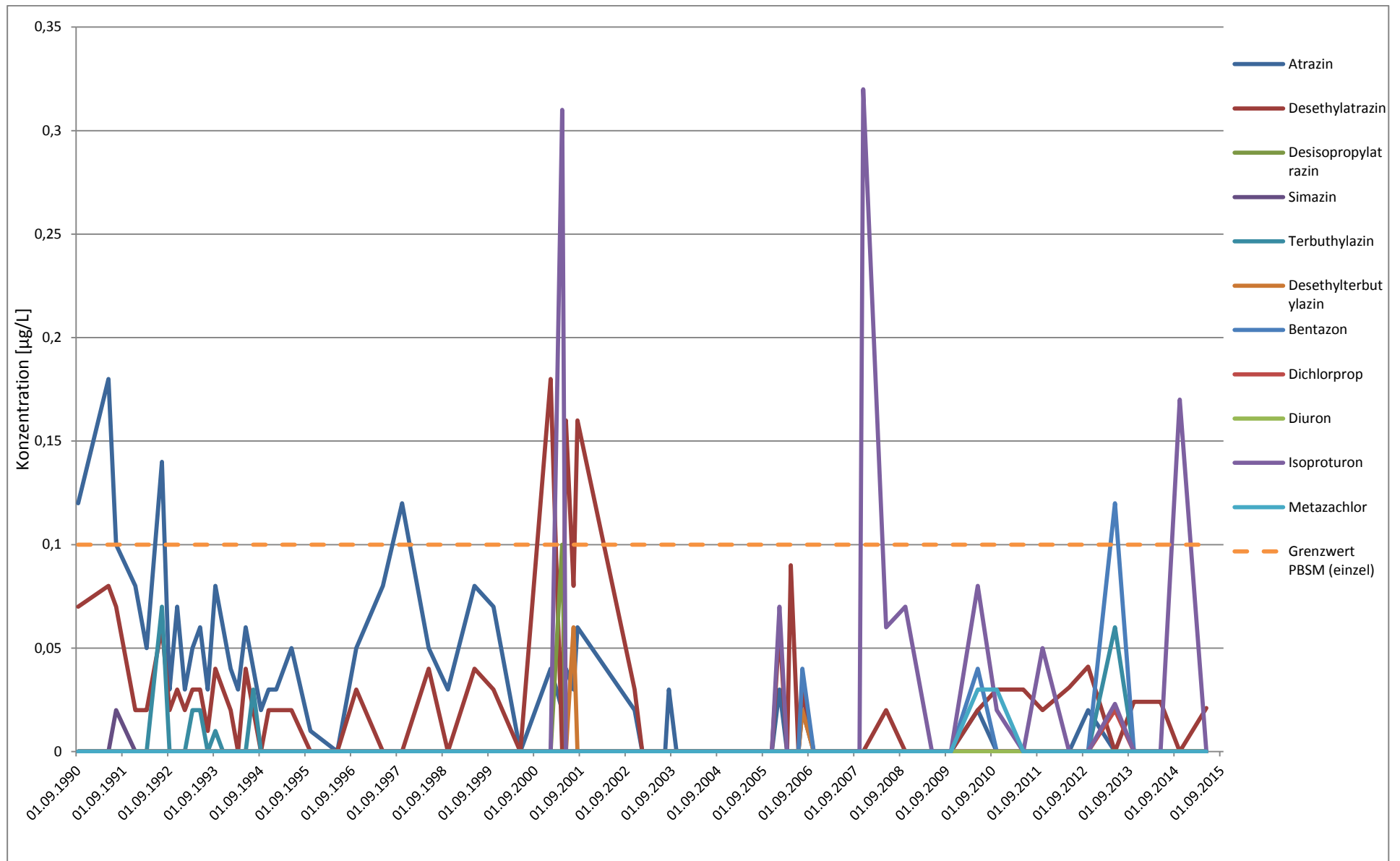
## **Anhang 10**

### **Untersuchungsergebnisse PSM und BP**

		WFW (2013-2015)	Main (1990-2015)	S2 (2006-2015)	N1 (2006-2015)	N2 (2006-2015)	HS (1994-2015)	S1 (1994-2015)	HM (1994-2015)
Atrazin	µg/L	<0.02	<0,01 bis <b>0,18</b>	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01 bis 0,03	<0,01 bis 0,01	<0,02 bis 0,02
Desethylatrazin	µg/L	<0.02	<0,01 bis <b>0,18</b>	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01 bis 0,06	<0,01 bis 0,01	<0,02 bis 0,04
Desisopropylatrazin	µg/L	<0.02	<0,01 bis <b>0,1</b>	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02 bis <0,04	<0,02 bis <0,04	<0,02
Simazin	µg/L	<0.02	<0,01 bis 0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01 bis <0,02	<0,01 bis <0,02	<0,02
Terbuthylazin	µg/L	<0.02	<0,01 bis 0,07	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01 bis <0,02	<0,01 bis <0,02	<0,02
Desethylterbutylazin	µg/L	<0.02	<0,01 bis 0,06	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02 bis <0,04	<0,01 bis <0,04	<0,02
Bentazon	µg/L	<0.02	<0,01 bis <b>0,12</b>	<0,02 bis <0,03	<0,02 bis <0,03	<0,02 bis <0,03	<0,02 bis <0,1	<0,02 bis <0,1	<0,02 bis <0,03
Dichlorprop	µg/L	<0.02	<0,01 bis 0,02	<0,02 bis <0,05	<0,02 bis <0,05	<0,02 bis <0,05	<0,02 bis <0,05	<0,02 bis <0,05	<0,02 bis <0,05
Isoproturon	µg/L	<0.02	<0,01 bis <b>0,32</b>	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01 bis <0,04	<0,01 bis <0,04	<0,02
Metazachlor	µg/L	<0.02	<0,01 bis 0,03	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01 bis <0,02	<0,02
Benzo-(b)-fluoranthen	µg/L	<0.01	n.b.	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo-(k)-fluoranthen	µg/L	<0.01	n.b.	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo-(g,h,i)-perylene	µg/L	<0.01	n.b.	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Indeno-(1,2,3-cd)-pyren	µg/L	<0.01	n.b.	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Diuron	µg/L	n.b.	<0,01 bis <0,05	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02 bis <0,1	<0,01 bis <0,04	<0,02
Benzo-(a)-pyren	µg/L	n.b.	n.b.	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025

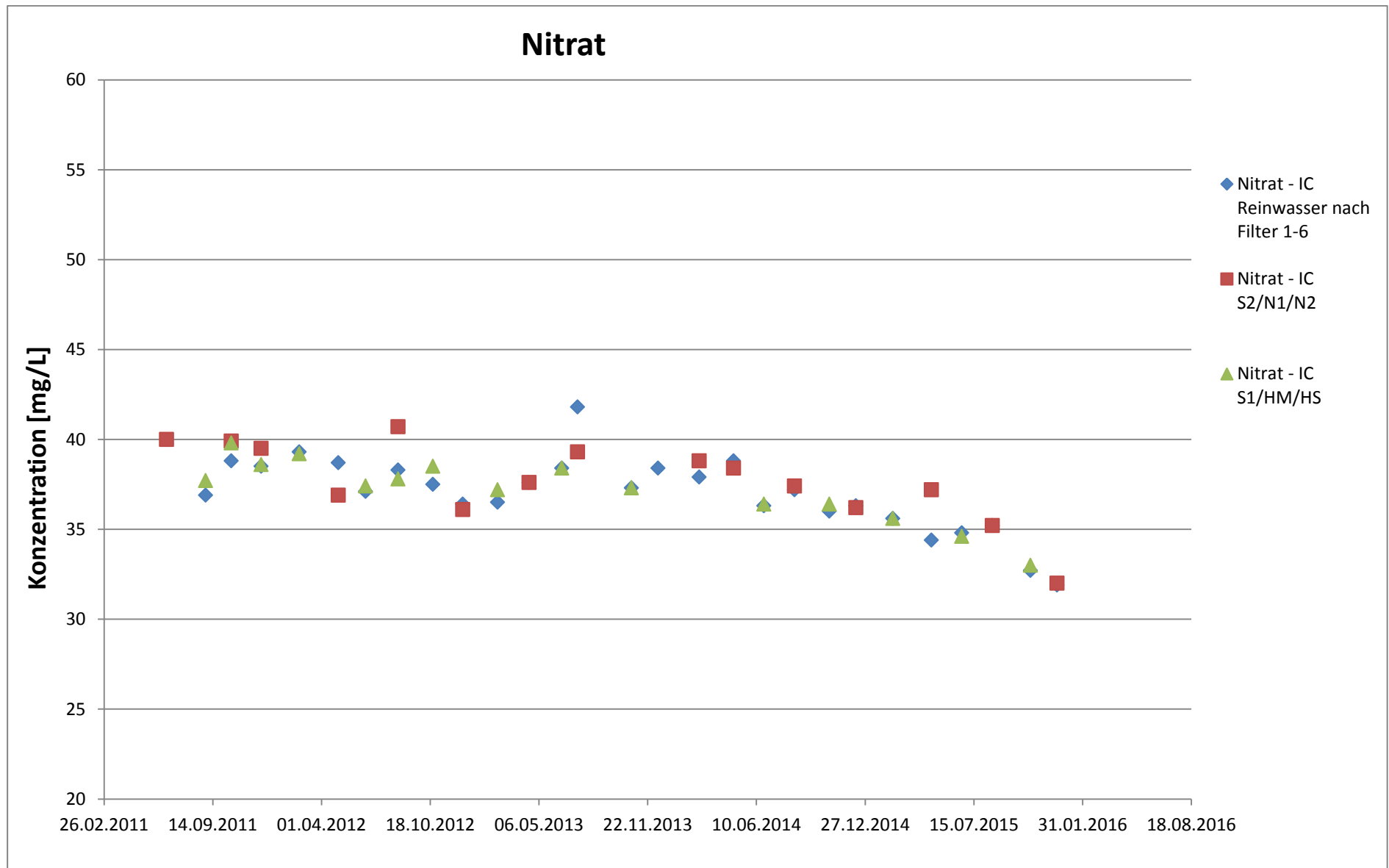
## **Anhang 11**

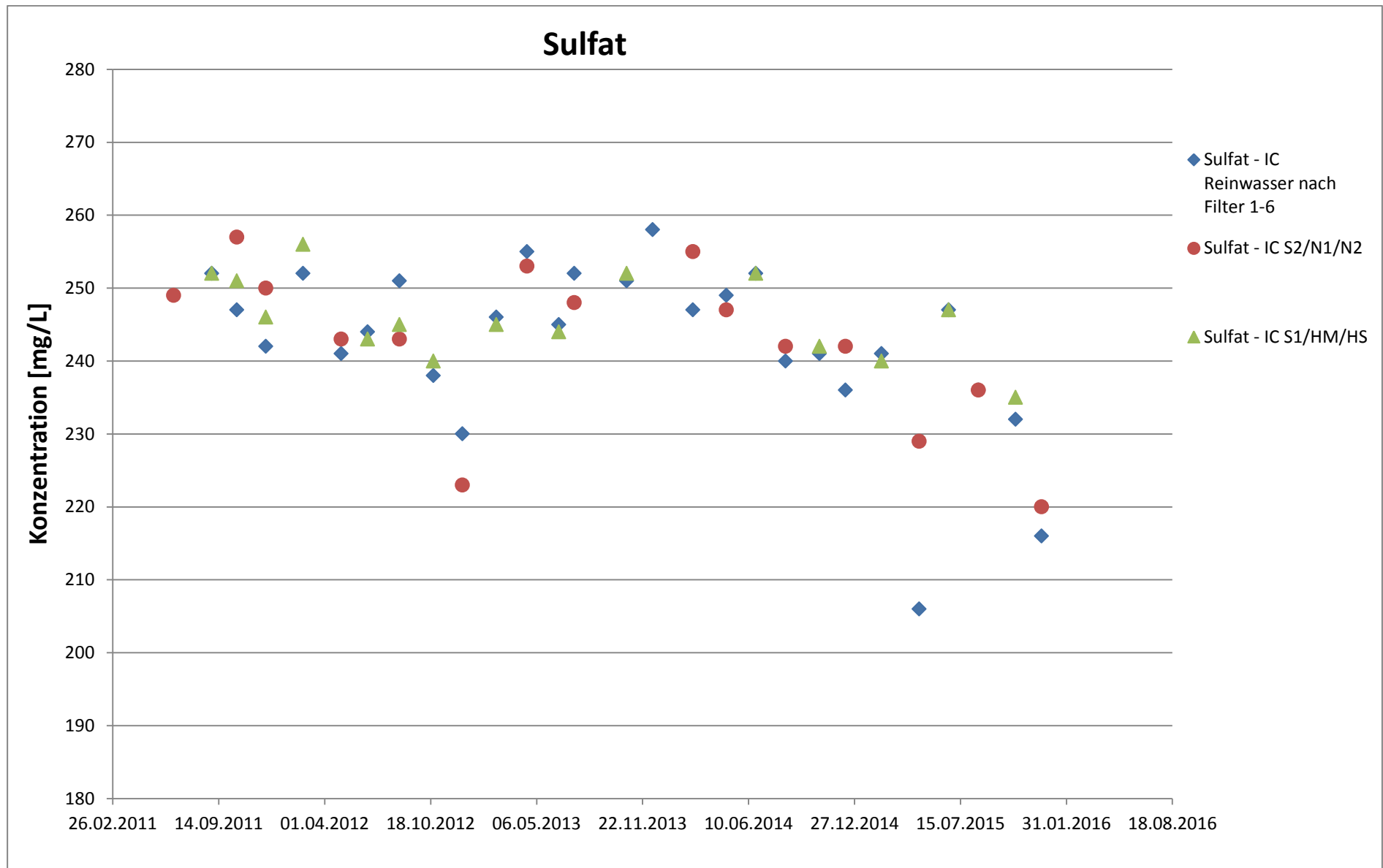
### **PSM und BP im Mainwasser von 1990 bis 2015**

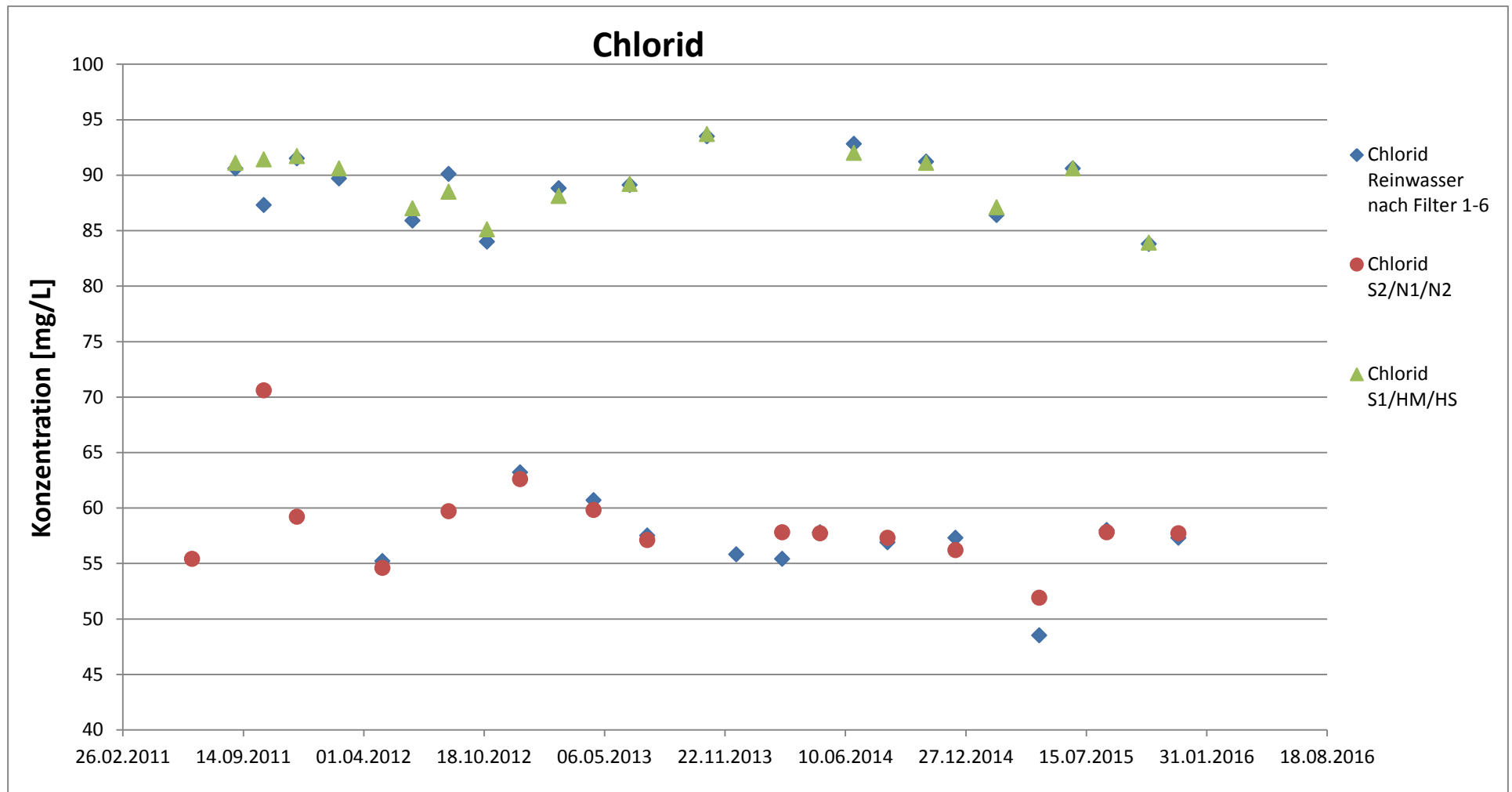


## **Anhang 12**

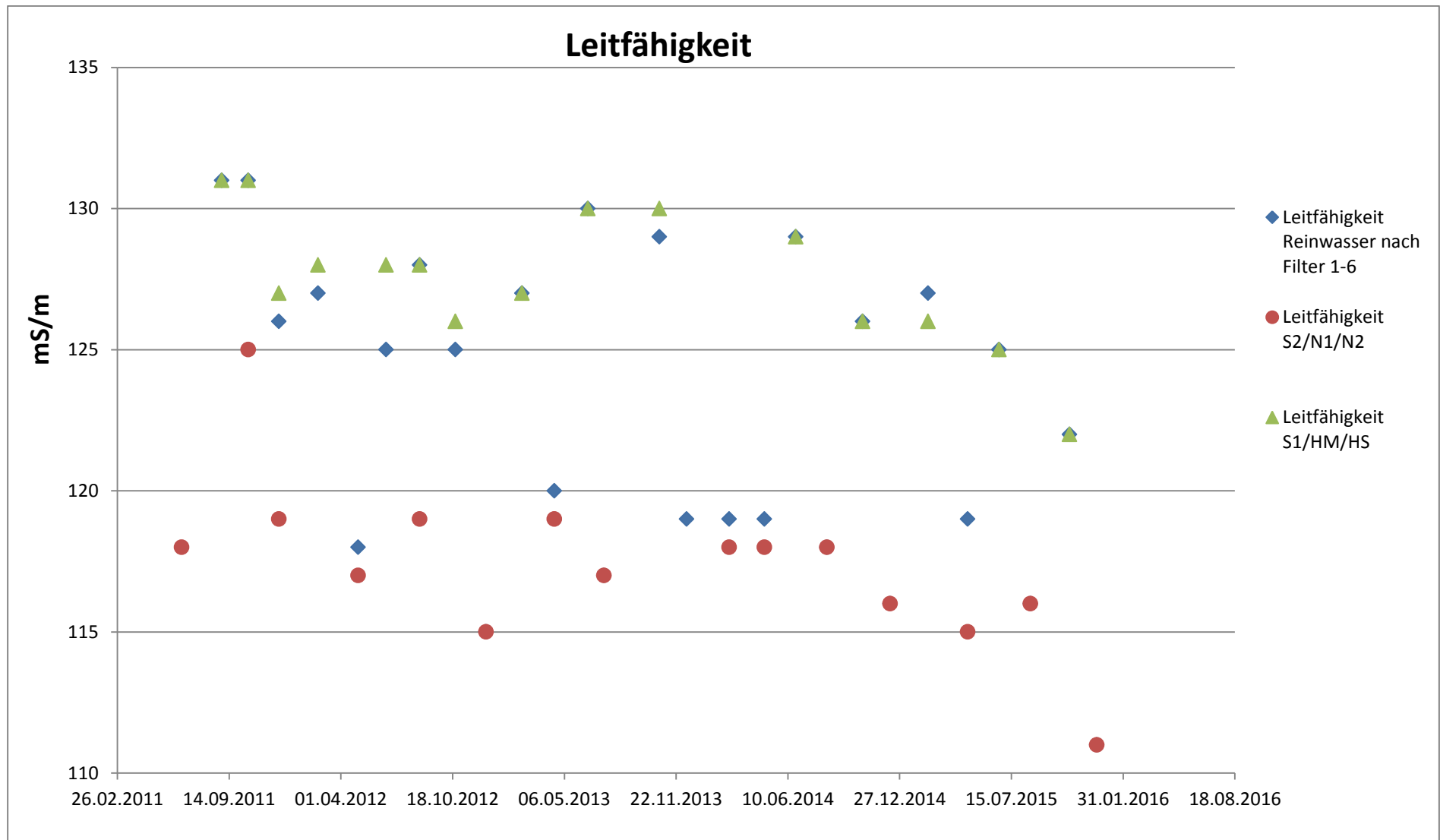
**Nitrat-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen, Leitfähigkeit und Trübung im Rohwasser der Brunnen S2/N1/N2 und S1/HM/HS und im aufbereiteten Eigenwasser (Reinwasser nach Filter 1 bis 6)**

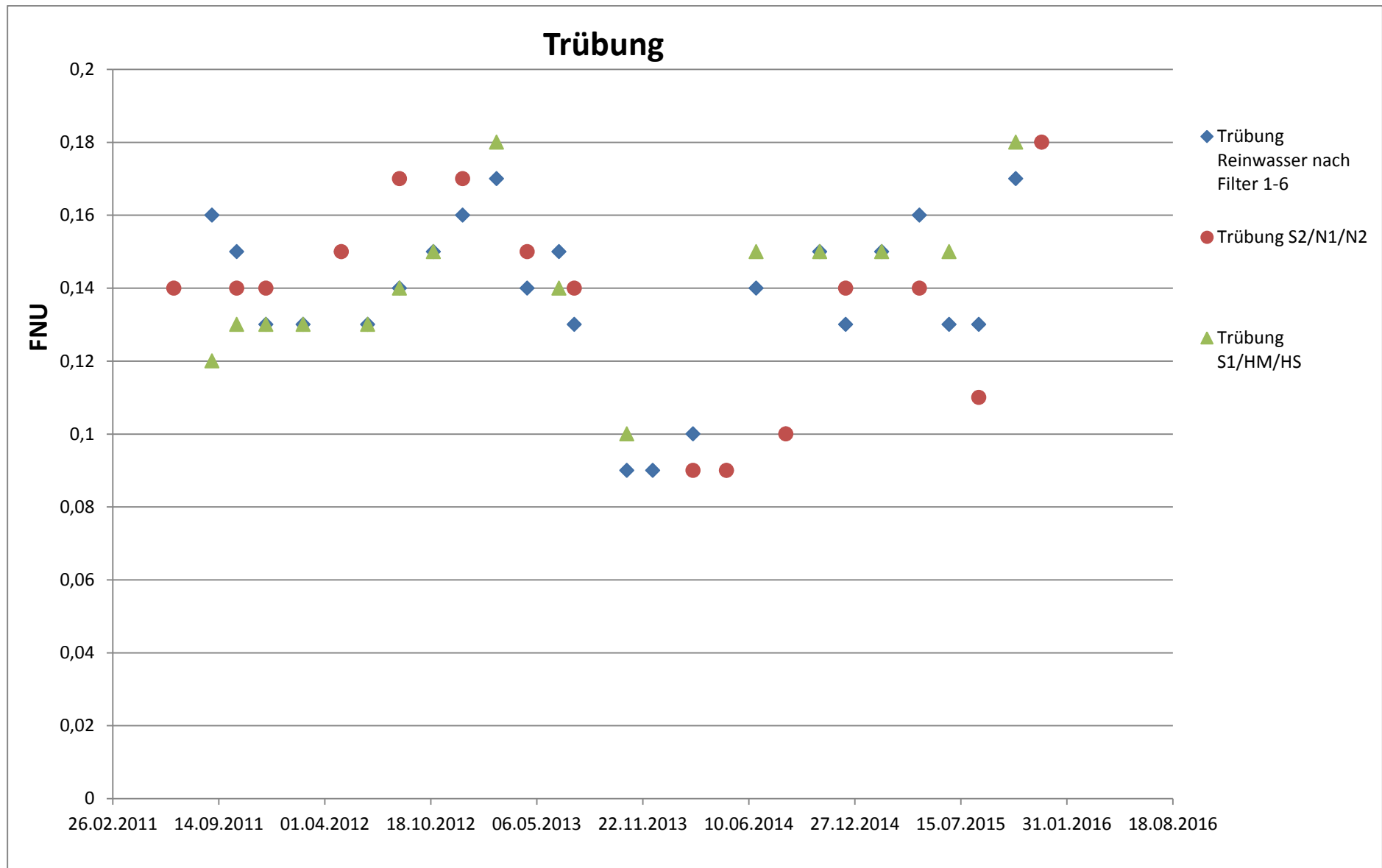












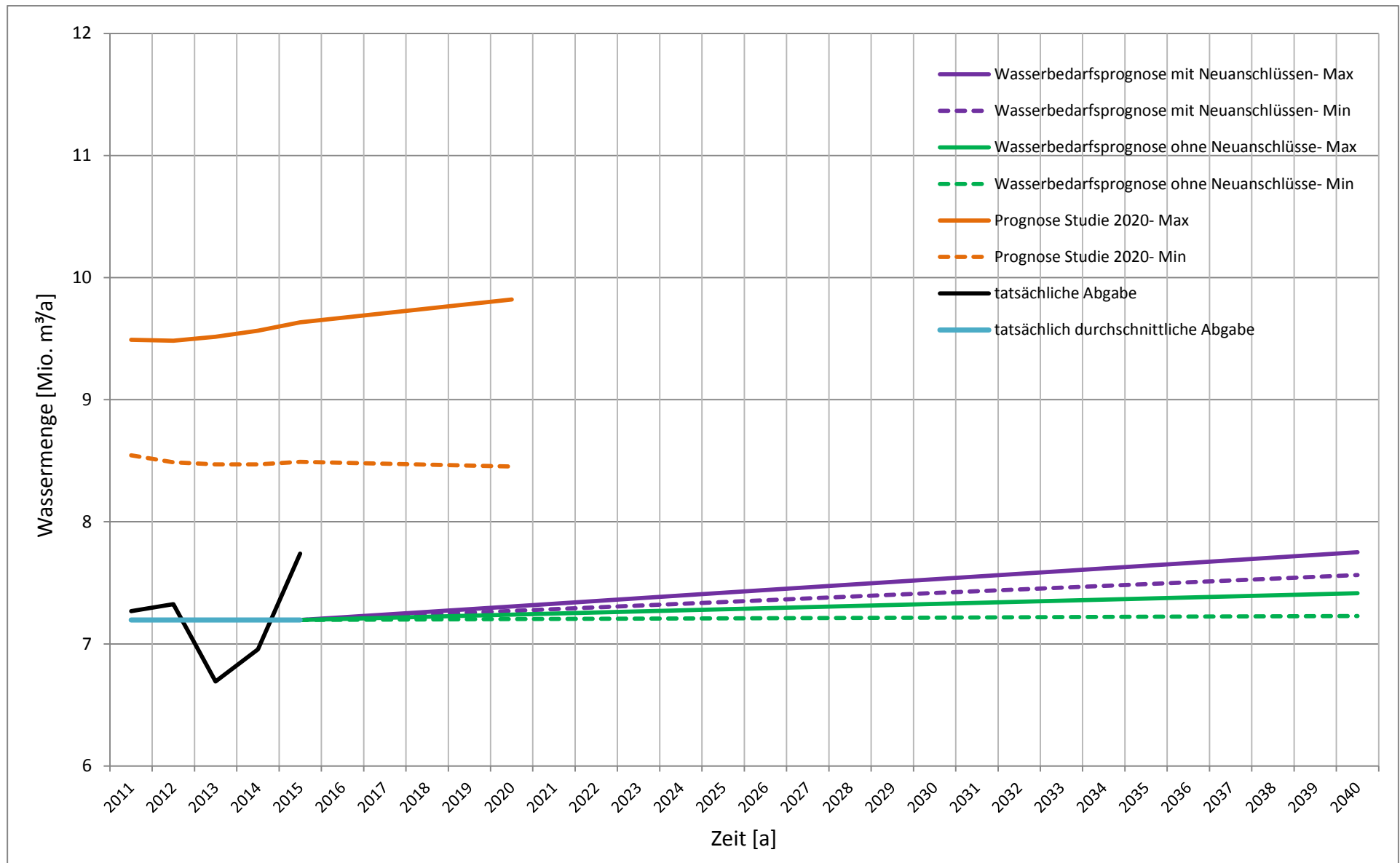
## **Anhang 13**

### **Zusammenfassung der qualitativen Auswertung**

Parameter	Rohwasser		Trinkwasser		
	S1/HM/HS	S2/N1/N2	Reinwasser nach Filter 1-6	Einlauf WFW	Trinkwasser nach Saugbehälter
Gesamthärte [mmol/L]	5,62 bis 6,04	5,53 bis 6,13	5,51 bis 6,1	2,12 bis 2,66	3,71 bis 3,99
Härtegrad	hart	hart	hart	mittel bis hart	hart
LKF [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	1.220 bis 1.306	1.110 bis 1.250	1.110 bis 1.300	433 bis 527	794 bis 848
pH	7,12 bis 7,2	7,11 bis 7,18	7,17 bis 7,26	7,57 bis 7,78	7,34 bis 7,39
Calcitlösekapazität [mg/L]	-15,4 bis -7,3	-17,7 bis -4,3	-25 bis -14,6	-13,8 bis -4,8	-13,6 bis -9,4
	kalkabscheidend	kalkabscheidend	kalkabscheidend	kalkabscheidend	kalkabscheidend
O <sub>2</sub> -Gehalt [mg/L]	0,9 bis 1,4	1,3 bis 2,1	6,9 bis 9,3	8,5 bis 10,6	8,2 bis 9,2
Eisen [mg/L]	0,0006 bis 0,0062	0,0005 bis 0,0022	<0,0005 bis 0,0014	<0,0005 bis 0,0031	<0,0005 bis 0,0021
Mangan [mg/L]	0,0017 bis 0,0115	<0,0005 bis 0,0031	<0,0005 bis 0,0015	<0,0005 bis 0,0018	0,0007 bis 0,0009
Nitrat [mg/L]	33,0 bis 39,8	32,0 bis 40,7	31,9 bis 41,8	4,0 bis 9,5	18,1 bis 18,9
Sulfat [mg/L]	235 bis 256	220 bis 257	206 bis 258	17,7 bis 24,9	118 bis 127
Chlorid [mg/L]	83,9 bis 93,7	51,9 bis 70,6	48,5 bis 93,5	10,6 bis 16,7	39 bis 52,1
Betonaggressivität nach DIN 4030	schwach betonangreifend	schwach betonangreifend	schwach betonangreifend	nicht betonangreifend	nicht betonangreifend
Korrosionswahrscheinlichkeit nach DIN EN 12502					
erhöhte Korrosionswahrscheinlichkeit	selektive Korrosion bei schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen	selektive Korrosion bei schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen	selektive Korrosion bei schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen	-	-
	gleichmäßige Flächenkorrosion bei Gusseisen, unlegierten und niedriglegierten Stählen	gleichmäßige Flächenkorrosion bei Gusseisen, unlegierten und niedriglegierten Stählen	-	-	-
beachtenswerte Korrosionswahrscheinlichkeit	Lochkorrosion in erwärmtem Wasser für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	Lochkorrosion in erwärmtem Wasser für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	Lochkorrosion in erwärmtem Wasser für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	-	Lochkorrosion in erwärmtem Wasser für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe
	-	-	-	-	selektive Korrosion bei schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen
Veränderung der Trinkwasserbeschaffenheit bei Einsatz von... (nach DIN 50930-6)	schmelztauchverzinkten Werkstoffen	schmelztauchverzinkten Werkstoffen	schmelztauchverzinkten Werkstoffen	schmelztauchverzinkten Werkstoffen	schmelztauchverzinkten Werkstoffen
	unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe	unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe			
mikrobiologischer Parameter		einmal coliforme Bakterien (1/100mL)	einmal coliforme Bakterien (1/100mL)	eingehalten	eingehalten

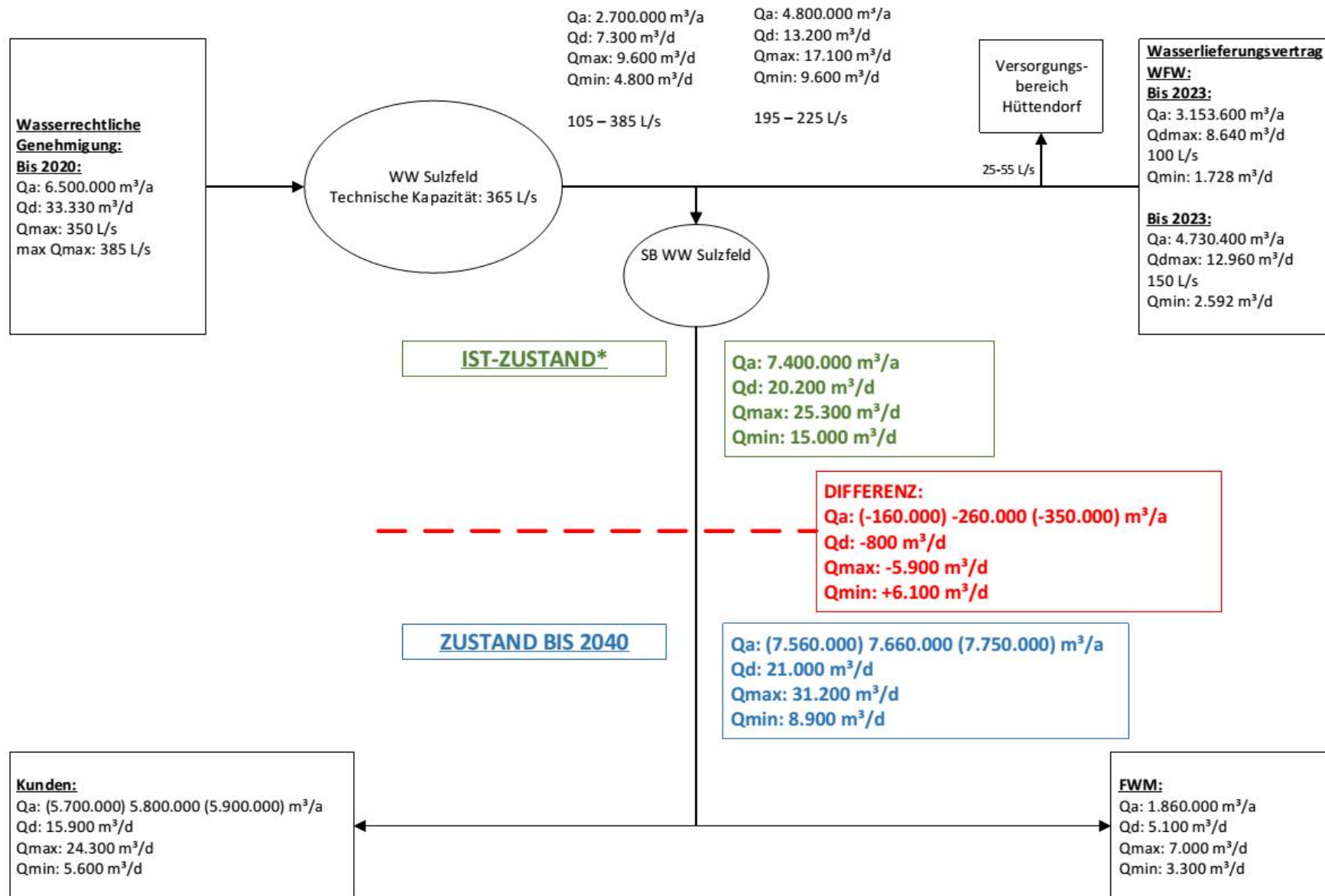
## **Anhang 14**

### **Wasserbedarfsprognose bis zum Jahr 2040**



## **Anhang 15**

### **Vergleich IST-Zustand mit Zustand bis zum Jahr 2040**



\* für die Durchschnittswerte aus den Betriebsdatenprotokollen von 2005 bis 2015



## **Anhang 16**

### **Kostenschätzung der Varianten**

		CARIX+AK	CARIX+AK+OZ	NF	LPRO
RW	m³/a	8.322.000	8.322.000	8.468.000	8.687.000
TW-abgabe	m³/a	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000
	m³/d	21.000	21.000	21.000	21.000
	m³/h	1.050	1.050	1.050	1.050
FW-Bezug	m³/a	2.920.000	2.920.000	2.920.000	2.920.000
EW	m³/a	5.402.000	5.402.000	5.548.000	5.767.000
Abwasser	m³/a	657.000	657.000	803.000	1.022.000
<b>Ausgangsdaten</b>					
Energiebedarf Brunnenpumpen (8bar/ 70% Wirk.gr.)	kWh/m³	0,22	0,22	0,23	0,23
Energiebedarf Aufbereitung	kWh/m³	0,18	0,21	0,35	0,41
Energiekosten	Cent/kWh	16	16	16	16
CO2-Verbrauch	kg CO2/m³	0,36	0,36		
Antiscalant	g/m³ Feed			4	4
Flächenbelastung	L/m²/h			30	25
Membranfläche LPRO (5+1 Straßen)	m²			17.667	22.000
Abwasserabgabe je Schadeinheit N oder P	€/SE	36	36	36	36
Stickstoff - Schadeinheit je volle Messeinheit	SE/kg	25	25	25	25
Phosphor - Schadeinheit je voll Messeinheit	SE/kg	3	3	3	3
<b>variable Betriebskosten</b>					
Energiebedarf Brunnenpumpen (8bar/ 70% Wirk.gr.)	EUR/a	270.000	270.000	277.000	288.000
Energiebedarf Aufbereitung (16 Cent/kWh)	EUR/a	220.752	257.544	429.240	502.824
CO2 (90 Euro/to)	EUR/a	248.000	248.000	0	0
Antiscalant (Phosphonsäure 5,0 Euro/kg)	EUR/a	0	0	77.380	80.300
<b>variable Betriebskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>738.752</b>	<b>775.544</b>	<b>783.620</b>	<b>871.124</b>
<b>je m³ Trinkwasser- abgabe</b>	<b>Cent/m³</b>	<b>9,6380</b>	<b>10,1180</b>	<b>10,2234</b>	<b>11,3650</b>
<b>Fixkosten</b>					
<b>Fixkosten Betrieb</b>					
Membranersatzkosten (28 Euro/m², 5 Jahre)	EUR/a	0	0	98.933	123.200
Kerzenfilter incl. Montage (1x pro Jahr u. Straße)	EUR/a	0	0	15.000	15.000
Aktivkohle (Standzeit 2a)	EUR/a	180.000	180.000	56.000	58.000
Abwasserabgabe (N, P)	EUR/a	17.700	17.700	25.077	50.366
CIP incl. Chemikalien	EUR/a	0	0	20.000	20.000
Fixkosten Betrieb	EUR/a	197.700	197.700	215.010	266.566
je m³ Trinkwasser-abgabe	Cent/m³	2,58	2,58	2,81	3,48
<b>Investitionskosten</b>					
Investitionskosten und Kapitaldienst (100% Finanzierung)					
Technische Ausrüstung incl. Planung					
CARIX/LPRO, E-MSR, Planung	EUR	10.000.000	10.000.000	7.000.000	7.000.000
	EUR/(m³/h)	9.524	9.524	6.667	6.667
Aktivkohlefilter	EUR	1.000.000	1.000.000	400.000	400.000
Ozonanlage	EUR		800.000		

Trafo, Mittelspannung	EUR	500.000	500.000	500.000	500.000
Sonstiges, Abw. Leitung	EUR	500.000	500.000	500.000	500.000
Somme, netto zzgl. MWSt	EUR	12.000.000	12.800.000	8.400.000	8.400.000
<b>Gebäude, Haustechnik, Planung</b>					
Kubatur (CARIX: Abwasser/Eluatsp., LPRO Rohwassersp.)	m³	17.000	17.000	15.500	15.500
Gebäude	EUR	4.250.000	4.250.000	3.900.000	3.900.000
Haustechnik (RLT, HLS)	EUR	500.000	500.000	500.000	500.000
Planung nach HOAI (20%)	EUR	950.000	950.000	880.000	880.000
Sonstiges	EUR	800.000	800.000	820.000	820.000
Summe, netto zzgl. MWSt	EUR	6.500.000	6.500.000	6.100.000	6.100.000
Gesamtsumme netto zzgl. MWSt	EUR	18.500.000	19.300.000	14.500.000	14.500.000
<b>Kapitaldienst (25/40 a, 1,0 % eff. Zins)</b>					
Verfahrenstechnik (25 a, 1,0% eff.)	EUR/a	544.881	581.206	381.417	381.417
Gebäude, Sonstiges (40 a, 1,0% eff.)	EUR/a	197.961	197.961	185.779	185.779
Summe	EUR/a	742.842	779.168	567.196	567.196
<b>Fixkosten</b>	<b>EUR/a</b>	<b>940.542</b>	<b>976.867</b>	<b>782.206</b>	<b>833.762</b>
<b>bez. auf Trinkwasser- abgabe</b>	<b>Cent/m³</b>	<b>12,3</b>	<b>12,7</b>	<b>10,2</b>	<b>10,9</b>

## **Anhang 17**

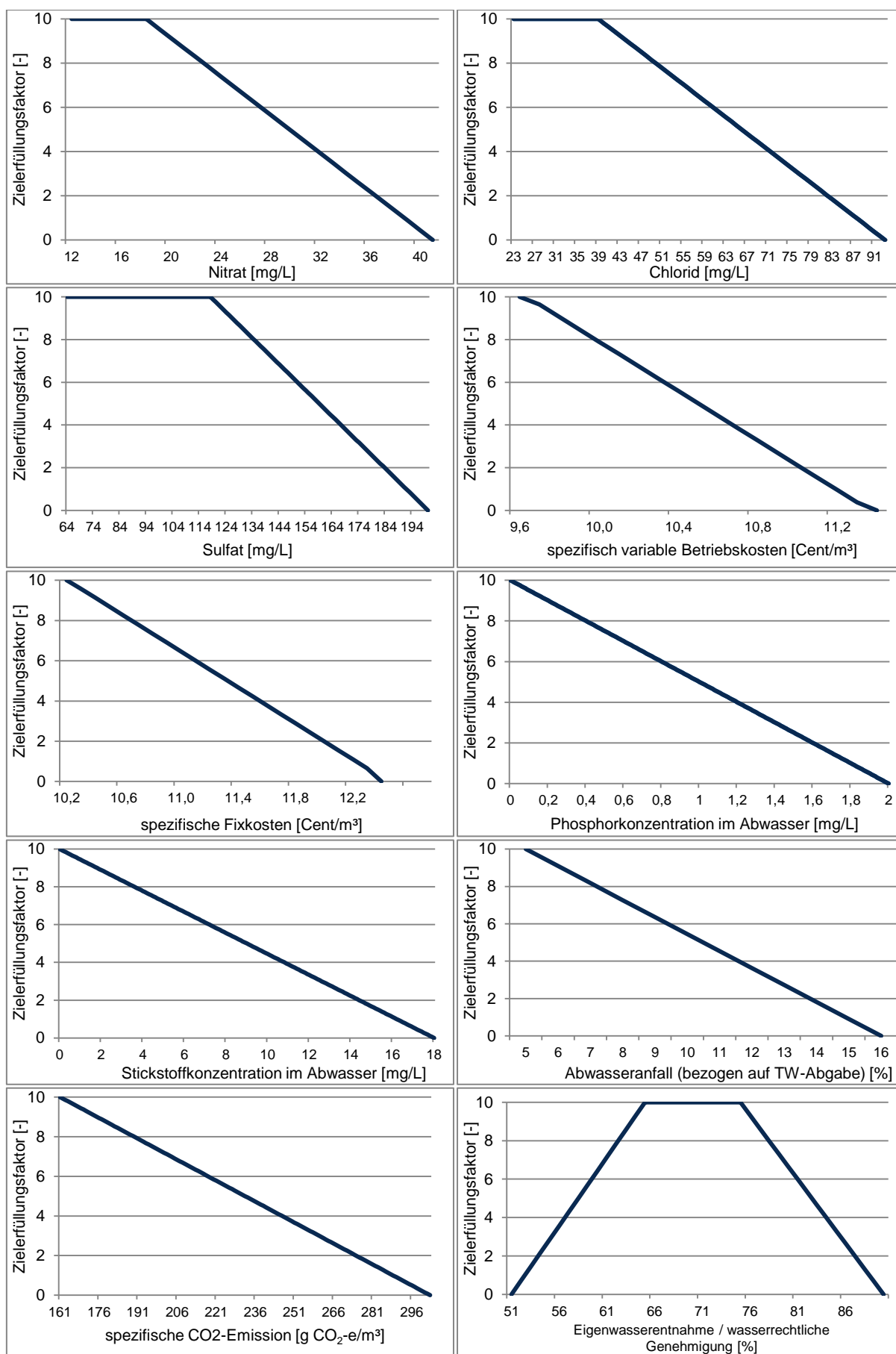
**Beispiel für die Gewichtung nach der AHP-Methodik (hier Gewichtung der Unterziele zum Hauptziel „I optimale TW-Beschaffenheit“)**

A	Verringerung der $\text{NO}_3^-$ -Konzentration
B	Verringerung der $\text{Cl}^-$ -Konzentration
C	Verringerung der $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration
D	Entfernung der anthropogenen organischen Spurenstoffe

Evaluationsmatrix [E]										[v]	[vs]	[vs]*1/[v]			
	A	B	C	D	quadrierte Matrix				Reihen- und Gesamtsumme	Normalisierung (Eigenvektor)	Vektor der gewichteten Summen	Konsistenzvektor [kv]	Gewichtungsfaktor in %		
A	1	1	1	1/2	4	4	4	2	14	0,2	0,8	4	20,0	λ	4,00
B	1	1	1	1/2	4	4	4	2	14	0,2	0,8	4	20,0	CI	0
C	1	1	1	1/2	4	4	4	2	14	0,2	0,8	4	20,0	n	4
D	2	2	2	1	8	8	8	4	28	0,4	1,6	4	40,0	RI	0,89
									70	1	100,0			CR	0
														Bedeutung	konsistent

## **Anhang 18**

### **Zielfunktionen – Transformation der Zielwerte in Zielerfüllungsfaktoren**



---

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Chance nutzen mich bei Herrn Löhner zu bedanken, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit bei der FWF zu schreiben. Ihre Denkanstöße, fachliche Unterstützung, Motivation und Ehrlichkeit haben zum Gelingen dieser Abschlussarbeit maßgeblich beigetragen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern der FWF für ihr Verständnis bei der Beantwortung meiner vielen Fragen und ihre Kooperation bei der Datenbeschaffung.

Ein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Urban für seine Betreuung seitens der TU Darmstadt und seine Impulse zur Zwischenpräsentation. Vielen Dank, dass Sie die Anfertigung dieser Arbeit in Kooperation mit der FWF unterstützt haben. Weiterhin möchte ich mich bei Frau Geiß für ihre Betreuung seitens der Universität bedanken.

Ohne die Unterstützung von Herrn Sauer von „Veolia Water Technologies Deutschland GmbH“ wäre der Variantenvergleich nicht möglich gewesen. Danke für die Zeit, die Sie mir geschenkt haben zur Beantwortung meiner Fragen und vor allem die Bereitstellung der Daten.

Großer Dank gebührt auch Herrn Dr. Donner und meinem Papa für die Lesekorrektur meiner Arbeit.

Die Zeit in Uffenheim hat mir mal wieder gezeigt, dass es ganz egal ist, ob man in der Großstadt lebt oder auf dem Dorf, was zählt sind menschliche Beziehungen und ein gutes Umfeld. Ich weiß nicht, wie ich Lore und ihrer Familie danken kann, die mich als wildfremde Person einfach mit auf ihrem Hof und ihr Leben aufgenommen haben. Euch habe ich es zu verdanken, dass diese eigentlich stressige und nervenaufreibende Phase für mich zu einer der schönsten und lehrreichsten Zeiten meines Studiums wurde.

Danken möchte ich an dieser Stelle auch meinem Papa für die vielen fachlichen Diskussionen (zum Leidwesen unserer Familie), seine Geduld, Erklärungen, Ratschläge und allgegenwärtige Hilfsbereitschaft.

Der letzte Dank gebührt meiner Familie und Steffen. Danke, dass ihr jeden Tag für mich da seid und ich auf euch zählen kann, wenn ich nicht weiter weiß. Danke aber auch für eure Offenheit und Kritik, die mich immer weitergebracht haben.



---

# **Ehrenwörtliche Erklärung und Sperrvermerk**

Abschlussarbeit von:

Frau Magdalena Gabriele Krüger

## **Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 23, Abs. 7 APB**

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Der Inhalt dieser Arbeit darf Dritten ohne Genehmigung der Fernwasserversorgung Franken nicht zugänglich gemacht werden.

Darmstadt, den 12.08.2016

.....

Unterschrift